

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroniky**

**Elektronická zátěž**

**Electronic Load**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroniky

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Filip Machů**  
Studijní program: N2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 2612T015 Elektronika  
Téma: Elektronická zátěž  
Electronic load

Zásady pro vypracování:

1. Specifikujte oblasti použití a možnosti realizace elektronických zátěží
2. Proved'te návrh a realizaci vybraného typu zátěže
3. Měřením ověřte správnou činnost realizovaného zapojení

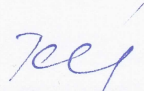
Seznam doporučené odborné literatury:

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tomáš Pavelek, Ph.D.**

Datum zadání: 19.11.2010

Datum odevzdání: 06.05.2011

  
doc. Ing. Petr Pálacký, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

**Prohlášení:**

*Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem veškeré literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.*

V Ostravě dne:

Podpis:

**Poděkování:**

*Na tomto místě bych si dovolil poděkovat vedoucímu své diplomové práce Ing. Tomáši Pavelkovi, Ph.D. za cenné podněty a připomínky k obsahu a formě zpracování.*

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá problematikou elektronických zátěží, které se používají pro testování v oblastech výzkumu a vývoje, výroby a vstupní a výstupní kontroly. V práci jsou probrány principy regulovatelných zátěží a hlavní parametry, kterých dosahují zátěže dostupné na trhu. Dále jsou nastíněny způsoby, jakými lze testovat různá elektronická zařízení, jako jsou napájecí zdroje, akumulátory, nabíječky, superkapacitory a podobně. Hlavní náplní práce je pak praktická realizace elektronické zátěže a ověření navržených parametrů pomocí měření.

## **Klíčová slova**

elektronická zátěž, režim konstantního proudu, režim konstantní napětí, režim konstantního odporu, režim konstantního výkonu

## **Abstract**

This thesis discusses using of electronic loads in research and designing of the electronic devices and manufacture, input and output control. In thesis are discussed principles of the regulated loads and main parameters of the loads which are available in the market. Further are discussed methods how to test various electronic devices. Such as power supplies, accumulators, battery chargers, supercapacitors and so on. Main goal of the thesis is to design and construct the Electronic Load and by measuring check that designing proces was successful.

## **Key words**

electronic load, constant current mode, constant voltage mode, constant resistance mode, constant power mode

# Obsah

1. Úvod.....	3
2. Možnosti realizace regulovatelných zátěží.....	3
2.1 Mechanické zátěže.....	4
2.1.1 Výkonové potenciometry (reostaty).....	4
2.1.2 Odporové dekády.....	5
2.2 Elektronické zátěže.....	5
2.2.1 Elektronicky spínané odporové dekády.....	5
2.2.2 Polovodičové elektronické zátěže.....	5
2.2.3 Polovodičové elektronické zátěže s tranzistory BJT.....	6
2.2.4 Polovodičové elektronické zátěže s tranzistory MOSFET.....	6
2.2.5 Polovodičové elektronické zátěže s tranzistory IGBT.....	7
2.2.6 Spínané elektronické zátěže.....	7
3. Parametry elektronických zátěží.....	8
3.1 Stejnoseměrné a střídavé zátěže.....	8
3.2 Režimy činnosti elektronických zátěží.....	8
3.2.1 Režim konstantního proudu (CC).....	8
3.2.2 Režim konstantního napětí (CV).....	9
3.2.3 Režim konstantního odporu (CR).....	10
3.2.4 Režim konstantního výkonu (CP).....	11
3.2.5 Speciální režimy.....	11
3.2 Pulzní a dynamické zatěžování.....	12
3.3 Způsob chlazení.....	13
3.4 Pracovní oblast.....	13
3.6 Ochrany elektronických zátěží.....	15
3.7 Paralelní spojení zátěží.....	16
3.8 Propojení s PC.....	17
3.9 Další funkce elektronických zátěží.....	17
4. Oblasti použití elektronických zátěží.....	19
4.1 Testování napájecích zdrojů.....	19
4.2 Testování akumulátorů.....	21
4.3 Testování nabíječek akumulátorů.....	22
4.4 Testování superkapacitorů.....	22
4.5 Testování fotovoltaiických článků.....	24
4.6 Testování dalších zařízení.....	24
5. Návrh a realizace elektronické zátěže.....	25
5.1 Hlavní parametry zátěže.....	25
5.2 Výkonový blok.....	27
5.2.1 Výpočet chladiče.....	28
5.3 Pracovní oblast.....	33
5.4 Vstupní blok.....	36
5.5 Řídící blok.....	38
5.5.1 Blok ochrany.....	40
5.6 Napájecí zdroj.....	44
5.7 Mechanická konstrukce.....	44
6. Měření.....	45
6.1 Měření parametrů zátěže.....	45
6.1.1 Měření účinnosti chlazení.....	45
6.1.2 Měření přesnosti panelových měřicích přístrojů.....	46

6.1.3 Měření režimu konstantního proudu.....	47
6.1.4 Měření režimu konstantního napětí.....	48
6.1.5 Měření režimu konstantního odporu.....	48
6.1.6 Měření režimu konstantního výkonu.....	50
6.1.7 Měření dynamických parametrů.....	51
6.2 Měření vybraných zařízení.....	53
6.2.1 Měření napájecího zdroje.....	53
6.2.2 Měření akumulátoru.....	54
6.2.3 Měření superkapacitoru.....	55
7. Závěr.....	57
8. Použitá literatura.....	58
9. Seznam příloh.....	60

# 1. Úvod

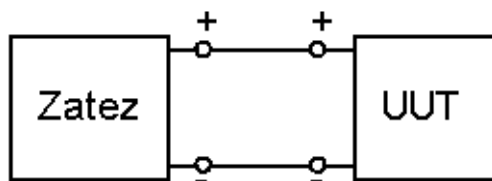
Regulovatelná zátěž je zařízení schopné odebírat elektrickou energii o nastavitelné hodnotě, tím simulovat chování různých elektrických spotřebičů a tedy snadněji testovat funkci zdrojů elektrické energie, které tyto spotřebiče napájí. Z toho vyplývá hlavní oblast použití zátěží – měření a testování v oblastech výzkumu a vývoje, výroby, vstupní a výstupní kontroly.

Úvodní kapitola této práce je věnována možnostem realizace regulovatelných zátěží. Nejjednoduššími reostaty počínaje a elektronicky řízenými zátěžemi konče. V další části je věnována pozornost parametrům elektronických zátěží dostupných na trhu. Zejména jsou rozebírány režimy činnosti ve kterých zátěže pracují, jakých dosahují parametrů a jakými funkcemi jsou vybaveny. Následující část je pak věnována oblasti použití zátěží.

Hlavní částí práce je pak samotný návrh elektronické zátěže, kterému se věnuje pátá kapitola. Jsou zde diskutovány hlavní parametry navržené elektronické zátěže, výpočteno chlazení, navržený obvod výkonové části, řídicí obvody, obvody vstupní části převádějící vstupní veličiny na měřitelná napětí, navržený obvod ochrany a popsána mechanická konstrukce. V další kapitole je pak s realizovanou elektronickou zátěží provedeno několik měření, ověřujících její funkčnost. Dále je také změřeno několik vybraných zařízení – napájecí zdroj, akumulátor a superkapacitor.

## 2. Možnosti realizace regulovatelných zátěží

Nejjednodušším a historicky prvním typem regulovatelné zátěže je nastavitelný reostat, který simuluje funkci proměnného odporu. S vývojem elektroniky dochází k objevu napětím řízených zdrojů proudu. Tyto jsou v elektronických zátěžích obvodově realizovány s využitím operačního zesilovače ve funkci řídicího prvku a výkonového tranzistoru ve funkci regulátoru proudu, který je odebírán z testovaného zařízení. Jelikož nelze vždy přesně říct, zda je testované zařízení napěťovým nebo proudovým zdrojem, a nelze jej tudíž zakreslit do schématu značkou která by byla vhodná, používá se blokové označení testovaného zařízení a pojmenování zkratkou UUT – z anglického Unit Under Test (někdy se také používají zkratky DUT – Device Under Test nebo SUT – Source Under Test). V dalším textu bude tedy používána zkratka UUT. Pro regulovatelnou zátěž se v literatuře žádná zkratka nepoužívá. V anglicky psané literatuře bývá na blokových schématech označena Load, Electronic Load nebo E-Load. Na obr.2.1 je základní blokové schéma zobrazující jakým způsobem jsou zátěž a testované zařízení propojeny.



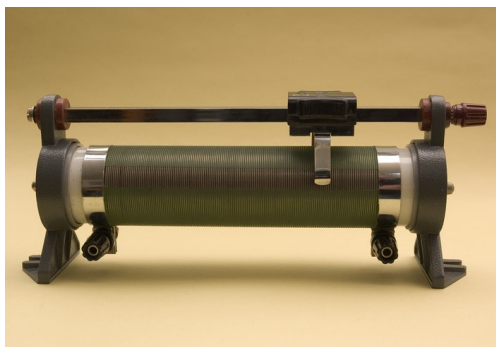
Obr. 2.1 Propojení zátěže a testovaného zařízení



## 2.1 Mechanické zátěže

### 2.1.1 Výkonové potenciometry (reostaty)

Jedná se o nejjednodušší typ regulovatelné zátěže. Velikost odporu je regulována mechanickým pohybem jezdcé po odporové dráze. Tato odporová dráha je v případě výkonového potenciometru tvořena odporovým drátem navinutým na keramickém tělese podélného nebo kruhového tvaru. Jedná se tedy o tahový nebo otočný výkonový potenciometr. Způsob provedení je uveden na obr.2.2.

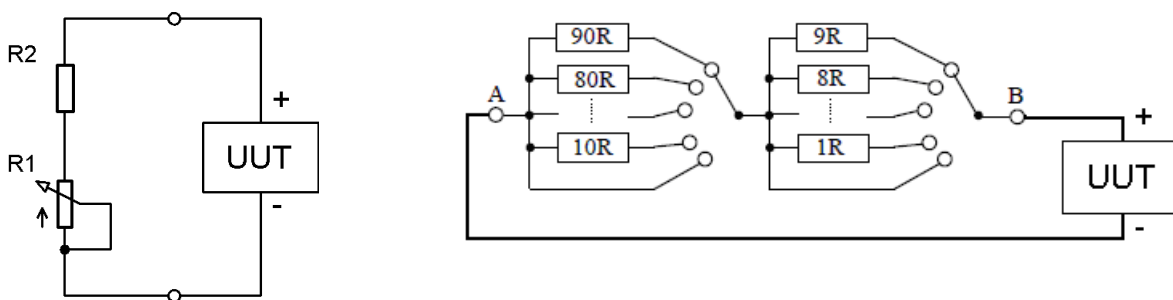


Obr. 2.2 Příklad provedení mechanických zátěží

- a) posuvný reostat
- b) otočný reostat

Tyto potenciometry jsou k testovanému zařízení připojeny způsobem jaký je naznačen na schématu na obr.2.3a. Obvod bývá ještě doplněn druhým výkonovým rezistorem sloužícím k ochraně potenciometru a testovaného zařízení proti přetížení při posunutí jezdcé na nejnižší hodnotu odporu.

Dnes se s těmito typy zátěží setkáme už jen v laboratořích. Dříve byly reostaty používány pro nastavení budících i napájecích proudů stejnosměrných elektromotorů, například v tramvajích. Jejich nevýhodou je však velký mařený výkon přeměněný na teplo. Proto byly nahrazeny polovodičovými prvky.



Obr. 2.3 Připojení mechanických zátěží k testovanému zařízení

- a) zapojení s reostatem
- b) zapojení s odporovou dekadou

## 2.1.2 Odporové dekády

Princip činnosti je naznačen na obr.2.3b. Pomocí spínačů se k vstupním svorkám dekády připojují rezistory o různých hodnotách odporů. Vhodnou volbou kombinace spínačů pak lze nastavit požadovanou velikost odporu.

Také tyto odporové dekády se používají pouze v laboratorních podmínkách a spíše v aplikacích nižších výkonů. Pro vyšší výkony by se jednalo o zařízení velkých rozměrů. Fotografie příkladu odporové dekády je na obr.2.4a.

## 2.2 Elektronické zátěže

### 2.2.1 Elektronicky spínané odporové dekády

Tyto zátěže se na rozdíl od mechanických zátěží v praxi běžně používají. Princip činnosti je podobný jako v případě odporové dekády, s tím rozdílem, že připojování výkonových rezistorů o různých hodnotách odporů, se neprovádí pomocí mechanických spínačů, nýbrž pomocí relé, které jsou ovládány elektronicky.

Tento typ zátěží vyrábí například česká firma MEATEST [9]. Na obr.2.4b je fotografie přesné výkonové odporové zátěže M-192. Je vidět, že se jedná o moderní elektronické zařízení ovládané pomocí klávesnice. Obsahuje 60 diskretních výkonových rezistorů různých hodnot. Jejich přepínáním lze nastavit rozsah odporu od  $15\Omega$  do  $300k\Omega$ . Maximální výkonová ztráta je  $3kW$ . Díky použití rezistorů je zátěž použitelná v širokém kmitočtovém rozsahu od stejnosměrného signálu až do kmitočtu  $10kHz$ .



Obr. 2.4 Příklad provedení odporových dekád  
a) mechanická odporová dekáda  
b) elektronicky řízená odporová dekáda

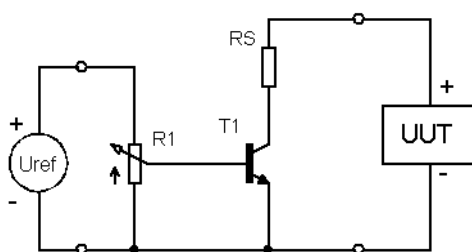
### 2.2.2 Polovodičové elektronické zátěže

Princip činnosti těchto zátěží je založen na regulaci průtoku proudu polovodičovým prvkem pomocí změny řídicího napětí, proudu či frekvence. Nejčastěji se používají MOSFET tranzistory, které lze řídit nízkým napětím. Pro náročnější aplikace se pak používají IGBT tranzistory, kombinující výhodné vlastnosti unipolárních a bipolárních tranzistorů. Bipolární tranzistory se v elektronických zátěžích nepoužívají, zejména kvůli problematice nastavení a udržení pracovního bodu. Také je

nelze použít pro vyšší výkony a mají menší odolnost proti přetížení. Regulaci velikosti odebíraného proudu lze také provádět změnou frekvence spínání polovodičových prvků. Bylo by tedy teoreticky možné použít i spínací součástky, jako tyristory či IGCT. Takto výkoné zátěže by však již nenašly své uplatnění, proto se i ve spínaných zátěžích používají MOSFET tranzistory.

### 2.2.3 Polovodičové elektronické zátěže s tranzistory BJT

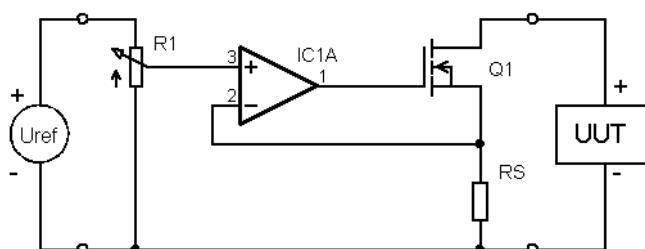
Příklad jakým způsobem může být realizována zátěž s bipolárním tranzistorem je uveden na obr.2.5. Jedná se o zapojení se společným emitorem. Další dvě známá zapojení, SC a SB již není možné pro zatěžování použít. Z důvodu malého proudového zesílení u SB a velkého vstupního odporu v případě SC. Změnou velikosti  $R_1$  se mění velikost bázevého proudu a tím se reguluje velikost proudu odebíraného z testovaného zařízení. Toto zapojení slouží jen pro příklad jakým způsobem by bylo možné BJT tranzistor v zátěži použít. V praktických aplikacích se ale tento typ tranzistorů nepoužívá, z důvodů jež byly uvedeny v předchozím odstavci.



Obr. 2.5 Elektronická zátěž s bipolárním tranzistorem

### 2.2.4 Polovodičové elektronické zátěže s tranzistory MOSFET

Tento typ tranzistorů je v zátěžích používán nejčastěji. Velikost otevření tranzistoru, a tím velikost proudu který teče mezi kolektorem a emitorem, lze řídit změnou velikosti napětí na vstupní svorce – gate. Řízení se nejčastěji provádí přes operační zesilovač (obr.2.6), na jehož neinvertující vstup je přiváděno regulované referenční napětí, a na invertující vstup zpětnovazební napětí ze sledovacího rezistoru  $R_S$ . Velikost tohoto napětí je dána úbytkem napětí na rezistoru, který je přímo úměrný velikosti zatěžovaného proudu. Tato zpětná vazba zajistí vhodné nastavení pracovního bodu tranzistoru a tím lineární průběh zatěžování.



Obr. 2.6 Elektronická zátěž s tranzistorem MOSFET

Na obr.2.7a je příklad elektronické zátěže s tranzistorem MOSFET, vyráběné bristskou společností TTI, s maximálním napětím 80V, proudem 80A a výkonem 300W [10].

## 2.2.5 Polovodičové elektronické zátěže s tranzistory IGBT

Tyto tranzistory se používají v elektronických zátěžích pro náročnější aplikace. Jejich výhodou je menší ztrátový výkon v sepnutém stavu, vysoké spínací frekvence a velký rozsah pracovních napětí a proudů. Podle [4] je maximální napětí IGBT tranzistorů až 6500V, maximální proud až 2400A a jsou použitelné pro výkony až jednotky megawatt. Také úbytek napětí mezi kolektorem a emitorem IGBT v sepnutém stavu s teplotou klesá (zatímco u MOSFETů stoupá), což je při použití v zátěžích výhodou. Ovládání IGBT lze provádět nízkým výkonem, stejně jako u tranzistorů MOSFET. Schéma zapojení bude tedy stejné jako na obr.2.6.

Příkladem výrobce těchto typů zátěží může být německý DIGATRON [11], který dodává zátěž s maximálním napětím 800V, proudem 600A a ztrátovým výkonem 480kW. Takto vysoké parametry jsou náročné na prostorové uspořádání a zátěž pak již svým rozměrem dosahuje velikosti vysokonapěťového rozvaděče, jak je možno vidět na obr.2.7b.



Obr. 2.7 Provedení elektronické zátěže o nízkém a vysokém výkonu

- a) zátěž o ztrátovém výkonu 300W
- b) zátěž o ztrátovém výkonu 480kW

## 2.2.6 Spínané elektronické zátěže

Některé společnosti také vyrábějí elektronické zátěže fungující na stejném principu jako spínané napájecí zdroje. Zatěžované zařízení je střídavě připojováno a odpojováno, přičemž frekvencí spínání lze řídit střední hodnotu odebíraného proudu. Toto řešení však může způsobit řadu komplikací zejména při testování napájecích zdrojů, kdy může dojít k jejich vypínání kvůli nadproudové ochraně. Střídavý impulsní odběr také může způsobit celkovou nestabilitu napájecího zdroje, či jeho přehřátí. Tento typ zátěží lze tedy vesměs použít jen pro testování akumulátorů a podobných zdrojů energie.

### 3. Parametry elektronických zátěží

V této kapitole jsou rozebrány nejdůležitější vlastnosti elektronických zátěží a parametry, kterými disponují zátěže dostupné na trhu.

#### 3.1 Stejnosměrné a střídavé zátěže

Základní rozdělení elektronických zátěží je podle druhu vstupního zatěžovaného proudu na stejnosměrné (DC) a střídavé (AC). Stejnosměrné zátěže lze použít pouze pro zatěžování proudu tekoucího jedním směrem. Jsou tedy konstrukčně jednodušší jelikož se vystačí jen s tranzistory zapojenými v jednom směru. Také měření a vyhodnocení stejnosměrných veličin je jednodušší. U střídavých zátěží, které jsou schopny zatěžovat střídavý proud libovolného průběhu, je konstrukčně náročnější řešení změny polarit napětí na tranzistorech, které se provádí formou antiparalelních zapojení. Také měření a vyhodnocení střídavých veličin je náročnější. Proto jsou střídavé zátěže nákladnější, avšak jejich oblast použití je mnohem širší než v případě zátěží stejnosměrných.

#### 3.2 Režimy činnosti elektronických zátěží

Dalším základním parametrem pro rozdělení zátěží je režim činnosti ve kterém jsou zátěže schopny pracovat. Reostaty a odporové dekády popsané v kapitole 2.1 dovolují pouze nastavení elektrického odporu – pracují tedy v takzvaném režimu konstantního odporu. Většina elektronických zátěží dovoluje funkci ve čtyřech základních režimech činnosti:

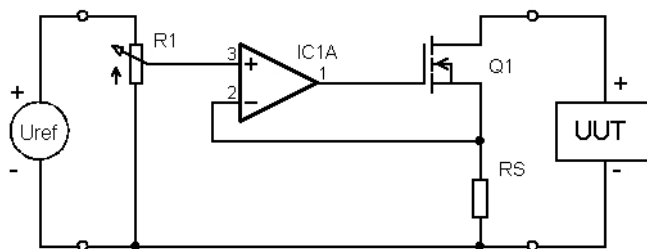
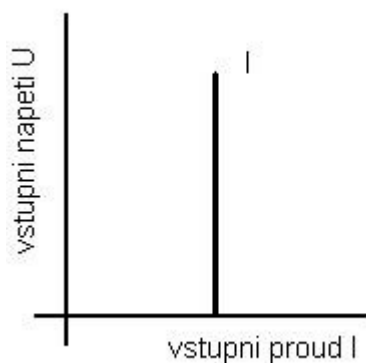
- 1) Režim konstantního proudu – označovaný zkratkou CC (z angl. Constant Current)
- 2) Režim konstantního napětí – označovaný zkratkou CV (Constant Voltage)
- 3) Režim konstantního odporu – označovaný zkratkou CR (Constant Resistance)
- 4) Režim konstantního výkonu – označovaný zkratkou CP (Constant Power) nebo CW

Dále jsou používány i speciální režimy, například režim konstantní impedance (CZ - Constant Impedance), režim konstantní konduktance (CG – Constant Conductance) nebo režimy kombinující čtveřici základních režimů činnosti (CC + CV nebo CR + CV). Všechny režimy jsou shodné v tom, že vždy dochází k řízení proudu odebíraného z testovaného zařízení. Odlišnost je tedy pouze ve způsobu vyhodnocení vstupních veličin v řídicích obvodech.

##### 3.2.1 Režim konstantního proudu (CC)

Jedná se o základní režim ve kterém elektronické zátěže pracují. Jak již název napovídá, je v tomto režimu zátěž schopná udržet hodnotu konstantního proudu bez ohledu na změny napětí (obr.3.1a). Princip činnosti byl již naznačen v kapitole 2.2.4 a příklad zapojení obvodu, který nám zajistí konstantní výstupní proud je uveden na obr.3.1b.

Pokud předpokládáme ideální podmínky, pak jediný proud, který může vyvolat úbytek napětí na odporu  $R_s$  je proud tekoucí ze zatěžovaného zařízení. OZ zesiluje rozdíl mezi tímto úbytkem napětí a napětím nastaveným potenciometrem  $R_1$ . Při vzrůstu napětí z  $R_1$ , dojde k nárůstu rozdílového napětí OZ, čímž se zvýší jeho výstupní napětí, které více otevře tranzistor  $Q_1$ . Tím se bude z testovaného zařízení odebírat vyšší proud a úbytek napětí na  $R_s$  ze zvětší. Rozdílové napětí na vstupu OZ se dorovná. Tím celá zpětnovazební struktura funguje jako zdroj konstantního proudu řízený napětím [3].



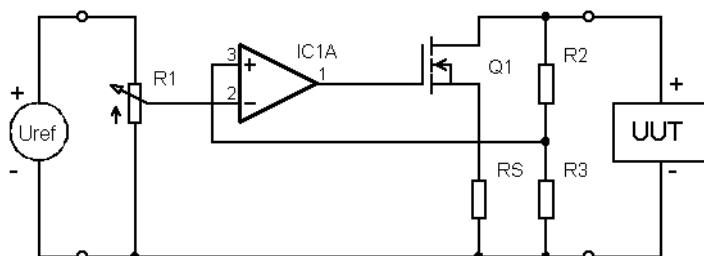
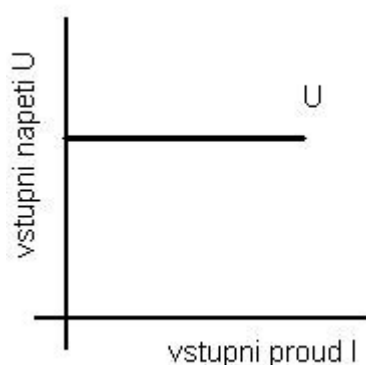
Obr. 3.1 Režim konstantního proudu

- a) volt-ampérová charakteristika
- b) příklad zapojení obvodu pro řízení konstantního proudu

Tento režim má při testování nejvyšší uplatnění, jelikož právě schopnost udržet hodnotu konstantního proudu je nejdůležitější při určování volt-ampérových charakteristik. Tyto nám poskytnout nejlepší přehled o vlastnostech testovaného zařízení. Pro příklad lze tedy uvést testování napájecích zdrojů, fotovoltaických a palivových článků, akumulátorů, superkapacitorů a dalších zdrojů energie.

### 3.2.2 Režim konstantního napětí (CV)

V tomto režimu zůstává velikost napětí na konstantní hodnotě bez ohledu na změnu velikosti odebíraného proudu (obr.3.2a). Příklad obvodu pro řízení konstantního napětí je uveden na obr.3.2b. Oproti předchozímu případu je třeba zaměnit vstupy operačního zesilovače, jelikož závislost mezi řídicím a sledovacím napětím je nepřímo úměrná. Při nastavení vyššího napětí na potenciometru  $R_1$  dojde k odběru většího proudu z testovaného zařízení, napětí na děliči  $R_2$   $R_3$  poklesne, tranzistor se začne uzavírat, čímž se sníží proud odebíraný z UUT a napětí na svorkách vzroste. Tato zpětná vazba tedy zajistí hodnotu konstantního napětí – zátěž odebírá největší možný proud, který ještě nezpůsobí pokles svorkového napětí zdroje.



Obr. 3.2 Režim konstantního napětí

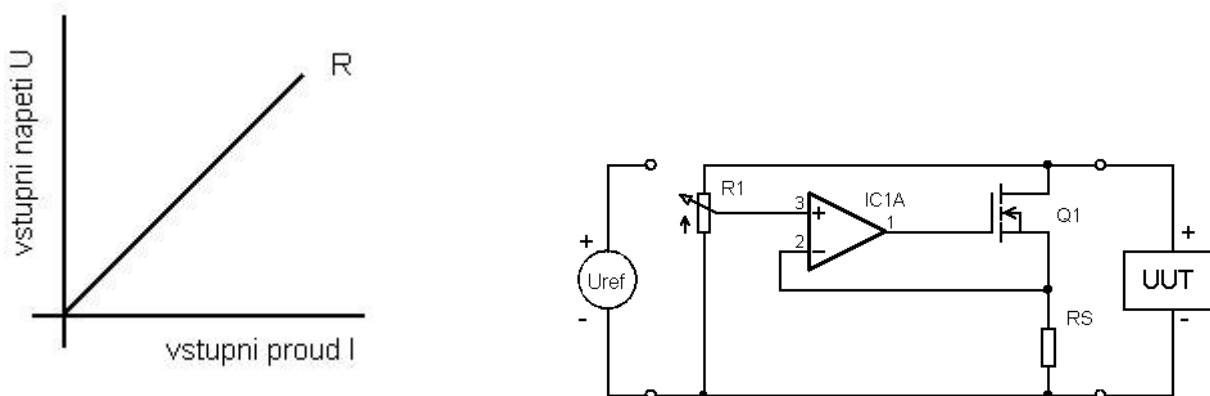
- a) volt-ampérová charakteristika
- b) příklad zapojení obvodu pro řízení konstantního napětí

V tomto režimu nemá zátěž žádný proudový limit. Testované zařízení se tudíž nachází téměř ve zkratu a je možné jej poškodit pokud nemá nadproudovou ochranu nebo se nezapne nadproudová ochrana zátěže.

Režim konstantního napětí je méně užitečný pro testování napájecích zdrojů. Využití nalezne jen při měření přepětové ochrany a rychlosti přeběhu napájecího zdroje. Daleko větší uplatnění nalezne při testování proudových zdrojů, tedy například nabíječek baterií a akumulátorů.

### 3.2.3 Režim konstantního odporu (CR)

V tomto režimu zátěž simuluje chování výkonového rezistoru s proměnnou hodnotou odporu. Změna velikosti vstupního napětí bude mít tudíž vliv na velikost odebíraného vstupního proudu, jako je tomu v klasickém obvodu s rezistorem, a jak je možno vypočítat z charakteristiky na obr.3.2a. Velikost odporu je u většiny zátěží regulovatelná od nuly či desítek až stovek miliohmů do řádově desítek ohmů. Většinou nepřekračuje hodnotu  $100\Omega$  (i když například zátěže od společnosti Hewlett-Packard dovolují nastavení odporu až do hodnoty  $10k\Omega$  [17])



Obr. 3.3 Režim konstantního odporu

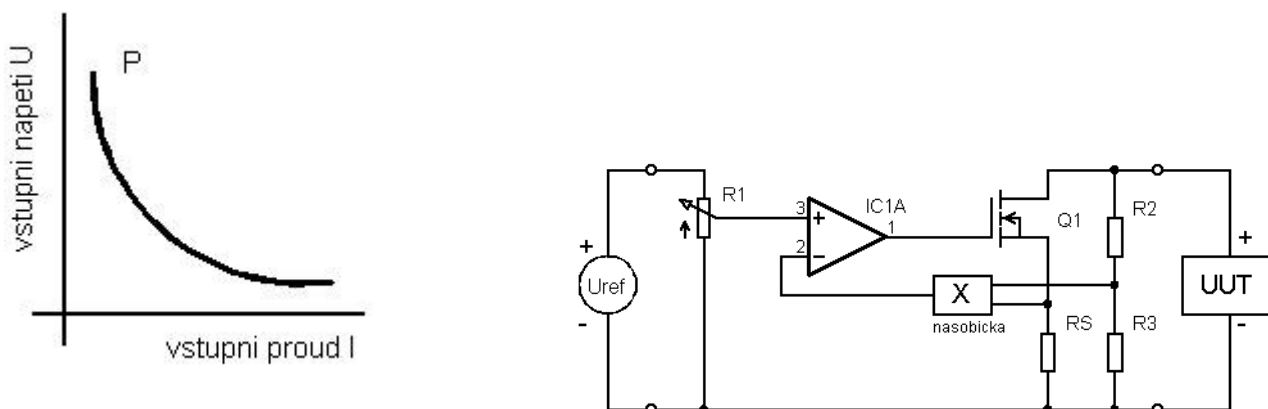
- a) volt-ampérová charakteristika
- b) příklad zapojení obvodu pro řízení konstantního odporu

Zjednodušené schéma zapojení je uvedeno na obr.3.3b. Řídící napětí se přes odporový dělič odebírá přímo z testovaného zařízení, referenční napětí tedy není vůbec potřeba. Potenciometrem R1 se nastaví požadovaná hodnota odporu. Pokud poté dojde ke zvýšení napětí na svorkách UUT, dojde také ke zvýšení napětí na vstupu, a tím i výstupu, zesilovače čímž se více otevře tranzistor Q1 a zátěž začne odebírat větší proud. Tím je tedy splněna podmínka přímé závislosti mezi napětím a proudem a zátěž tedy simuluje funkci odporu.

Tento režim činnosti se používá například pro testování budičů výkonových LED diod, kdy lze pomocí zátěže simulovat diferenciální odpor, který diody vykazují.

### 3.2.4 Režim konstantního výkonu (CP)

V tomto režimu je zátěž schopna odebrat z testovaného zařízení výkon o konstantní hodnotě (obr.3.4a). Výkon je dán součinem napětí a proudu, proto musí být zátěž schopna reagovat na změny vstupních veličin nepřímou úměrou – pokud tedy dojde k poklesu napětí zatěžovaného zařízení, zátěž musí být schopna zvýšit proud z něj odebíraný a tím zajistit stále konstantní hodnotu výkonu.



Obr. 3.4 Režim konstantního výkonu

a) volt-ampérová charakteristika

b) příklad zapojení obvodu pro řízení konstantního výkonu

V tomto případě je potřeba doplnit zjednodušené zapojení přidáním násobičky napětí na jejímž výstupu bude velikost napětí úměrná odebíranému výkonu, tedy součinu napětí testovaného zařízení a úbytku napětí úměrného odebíranému proudu. Násobička napětí by měla mít proudový výstup a na místě operačního zesilovače  $IC1A$  by měl být použit Nortonův zesilovač. Ten pracuje tím způsobem, že se snaží vyrovnávat vstupní proudy [1]. Výstupní proud násobičky se tedy bude stále dorovnávat proudu, který je nastaven potenciometrem  $R1$ . Výstupní proud zesilovače a tudíž i velikost otevření tranzistoru bude tedy reagovat na změny velikosti odebíraného proudu a svorkového napětí. Tím tedy bude docházet k odebrání konstantního výkonu.

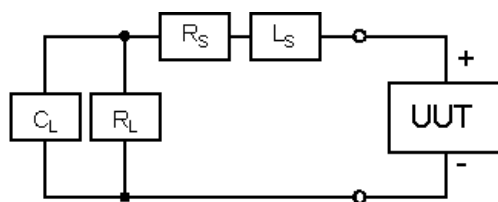
Tento režim se také používá pro měření akumulátorů. Jelikož s klesajícím napětím odebíraný proud vzrůstá, může nám toto testování poskytnout lepší představu o kapacitě měřeného akumulátoru, zejména u akumulátorů s velmi plochou vybíjecí charakteristikou (olověné nebo alkalické akumulátory). Režim se také používá k testování napájecích zdrojů, UPS a dalších zařízení u nichž je požadována schopnost udržet hodnotu stálého výkonu při různých podmínkách.

### 3.2.5 Speciální režimy

#### Režim konstantní impedance (CZ)

Tento testovací režim vyvinula společnost CHROMA [16] a používá jej u svých zátěžích. Schéma simulace při tomto režimu je zakresleno na obr.3.5. Zátěž tedy nastavuje parametry čtyř obvodových prvků – sériové indukčnosti, sériového odporu, vnitřní kapacity a vnitřního odporu imaginární zátěže. Režim umožňuje simulovat reálné impedance skutečných zátěží, které se projevují při zapínání a rychlých změnách zatěžovaného proudu.





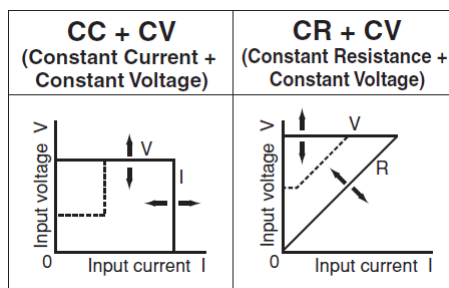
Obr. 3.5 Režim konstantní impedance

### Režim konstantní konduktance (CG)

Konduktance, neboli vodivost, je vyjádřena převrácenou hodnotou velikosti odporu. Hodnoty lépe popisují chování obvodu ve vodivém stavu, tedy v oblasti velmi nízkých přechodových odporů. Tento testovací režim tedy bude poskytovat lepší výsledky například v oblasti simulace ztrát na vedeních nebo různých nízko-ohmových zařízeních.

### Kombinované režimy

Zátěže některých výrobců také umožňují práci v kombinovaných režimech. Například série zátěží PLZ-U japonského výrobce KIKUSUI [13] umožňuje práci v režimu kombinujícím režimy konstantního proudu a konstantního napětí, nebo režimy konstantního odporu a konstantního napětí. Jak vypadají charakteristiky těchto kombinovaných režimů je znázorněno na obr.3.6.



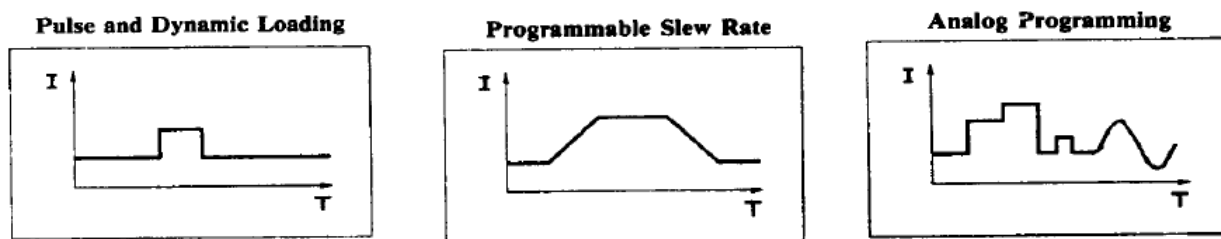
Obr. 3.6 Kombinované režimy

Teoreticky je možné vytvořit bezpočet kombinací různých režimů, jednak analogově, ale zejména s využitím softwarových prostředků. Záleží jen na potřebě a možnostech využití takovýchto kombinovaných režimů.

### 3.2 Pulzní a dynamické zatěžování

Většina elektronických zátěží dovoluje zatěžování v dynamickém režimu, kdy je možno měnit frekvenci a tvar řídicího signálu a tím simulovat chování různých zařízení. Zdroj řídicích impulsů je integrován buď v zátěži, nebo lze použít vstup z externího generátoru impulsů. Tvar řídicího signálu pak může být obdélníkový s proměnnou střídou a frekvencí. Může jít také o samostatný impuls s nastavitelnou šířkou a amplitudou (obr.3.7a) nebo náběžnou a sestupnou hranou (obr.3.7b). Tímto

se testují různé přenosové odezvy napájecích zdrojů, schopnosti zařízení zvládnout krátkodobé přetížení a podobně. Programovatelné generátory pak umožňují simulaci chování složitějších stavů, tzv. „reálného života“ (obr.3.7c).



Obr. 3.7 Pulzní a dynamické zatěžování

- samostatný impuls
- impuls s náběžnou a sestupnou hranou
- proměnný analogový signál

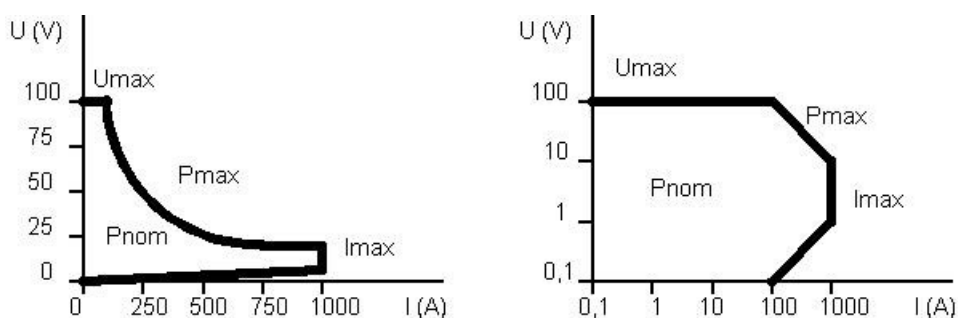
### 3.3 Způsob chlazení

Nejdůležitějším kritériem pro velikost výkonové ztráty zátěže je schopnost výkon efektivně uchlazen. Tedy odvést teplo od zahříváných polovodičových součástek. Používají se dva druhy chlazení – vzduchem a kapalinou. Vzduchem chlazené zátěže jsou konstrukčně jednodušší, robustnější a levnější. Lze je snadno přenášet a téměř nevyžadují údržbu. Pro vyšší výkony však dosahují velkých rozměrů. Efektivnější a účinnější je chlazení kapalinou. Toto řešení je však nákladnější, méně robustní a vyžaduje údržbu. Z důvodu přívodu a odvodu chladicího média je také komplikovanější přemísťování těchto zátěží na místo testování. Další nepříjemnou vlastností je kondenzace vodních par na povrchu trubek vedoucích chladící kapalinu uvnitř zátěže. Výběr jakým způsobem se bude jak velký výkon chladit není jednoznačně dán a mezi výrobci se liší. Například společnost TDI POWER používá chlazení vzduchem pro zátěže do výkonu 4kW. U zátěží od 12kW výše se již používá chlazení vodní [12].

### 3.4 Pracovní oblast

Pracovní oblast je grafické znázornění maximálních parametrů zátěže v systému souřadnic, kdy na jedné ose jsou zaneseny hodnoty testovaného napětí, a na druhé ose hodnoty testovaného proudu. Jednotliví výrobci udávají tuto oblast buď v systému lineárních souřadnic (obr.3.8a) nebo v systému logaritmických souřadnic (obr.3.8b). Systém logaritmických souřadnic je více přehledný a je u něj podstatněji snadnější odečítání hodnot v oblasti nejnižších napětí.

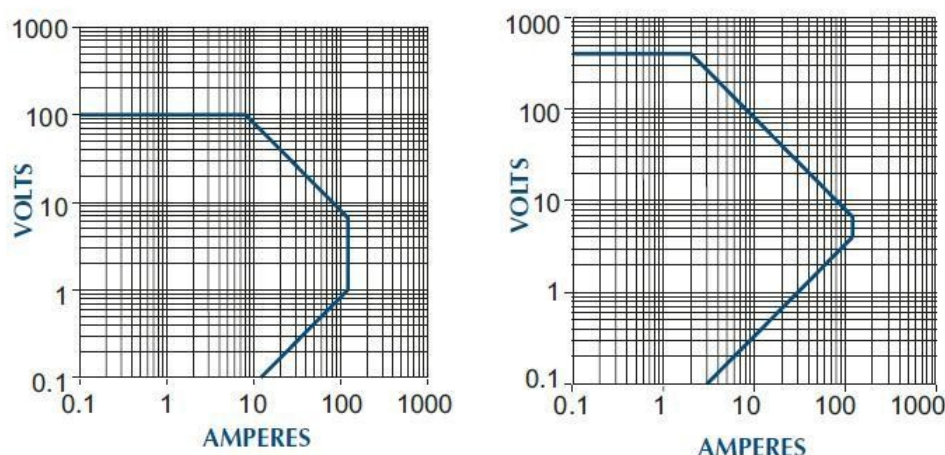
Na charakteristice jsou zakresleny tři základní proměnné určující mezní parametry zátěže. Hodnota  $U_{MAX}$  udává maximální napětí testovaného zařízení. Hodnota tohoto napětí nebývá vyšší než 1000V a většinou se pohybuje mezi 100V a 500V. Hodnota  $I_{MAX}$  udává maximální proud který může téct zátěží. Dosahuje velikosti až 1000A přičemž tuto hodnotu lze ještě zvýšit paralelním řazením zátěží.  $P_{MAX}$  pak označuje nejvyšší ztrátový výkon zátěže. Může se pohybovat řádově v desítkách či stovkách kilowattů u zátěží s IGBT tranzistory nebo při modulárním propojení zátěží.



Obr. 3.8 Způsob znázornění pracovní oblasti zátěže

- znázornění v oblasti lineárních souřadnic
- znázornění v systému logaritmických souřadnic

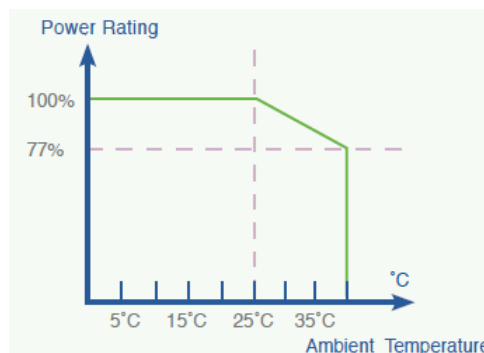
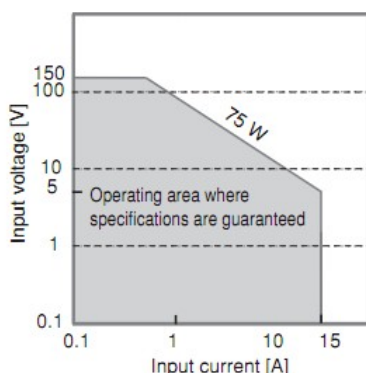
Další proměnnou, kterou však výrobci často neuvádějí, ale kterou je možno z charakteristiky vyčíst, je vnitřní odpor zátěže. Na tomto odporu závisí nejmenší napětí při kterém je zátěž schopna odebrat požadovaný proud. Z charakteristiky na obr.3.8b je možno vyčíst, že zátěž bude schopna maximální proud 1000A odebrat ještě při napětí 1V. Při napětí 0,1V bude však schopna odebrat již jen 100A. Vnitřní odpor je závislý hlavně na maximálním použitelném napětí zátěže, jak je možno pozorovat na charakteristikách na obr.3.9 pro dva podobné typy zátěží. První je určena pro maximální napětí 100V, druhá pro 400V. S maximálním napětím zátěže odpor roste a snižuje se maximální proud při nejmenším napětí.



Obr. 3.9 Příklad pracovních oblastí zátěží s různým maximálním napětím

- Elektronická zátěž 800W, 120A, 100V
- Elektronická zátěž 800W, 120A, 400V

Vnitřní odpor zátěže se pohybuje řádově v desítkách až stovkách miliohmů. Někteří výrobci, např. japonský KIKUSUI, však zacházejí ještě dále a garantují funkci zátěže, tedy schopnost odebrat proud, i při nulovém napětí (tzv. „0V input type“) [13]. Je tím spíše myšleno, že i při velmi nízkém napětí bude zátěž stále schopna odebrat maximální dovolený proud (odebrat proud při nulovém vstupním napětí není z fyzikálního hlediska možné). Zátěž bude mít tedy velmi nízký vnitřní odpor. Tohoto se dosahuje zejména u zátěží s nízkými mezními parametry. Charakteristika takové zátěže s nulovým vstupním napětím je na obr.3.10a. Její maximální výkon je pouhých 75W.



Obr. 3.10

- a) Pracovní oblast zátěže „0V input type“
- b) Vliv teploty na maximální ztrátový výkon zátěže

Na maximální ztrátový výkon zátěže má také vliv teplota okolí. Charakteristiku na obr.3.10b udává například společnost CHROMA [15]. Při vzrůstu teploty okolí na 40°C dojde k poklesu maximálního výkonového zatížení na 77%.

### 3.6 Ochrany elektronických zátěží

Stejně jako u většiny elektronických zařízení, je i v případě elektronických zátěží samozřejmostí systém ochran zajišťující bezpečnost provozu celého zařízení. U elektronické zátěže musí být ochranným obvodům přikládán větší význam tím spíše, že při poruše může dojít k poškození či zničení nejen dané zátěže, ale také testovaného zařízení. Základní typy ochran jsou následující:

#### Nadproudová ochrana

Označována zkratkou OCC – Over Current Protection. Bývá buď pevně nastavena na hodnotu 105 až 110% aktuálního proudového rozsahu nebo maximálního přípustného proudu zátěže, nebo bývá nastavitelná za účelem ochrany testovaného zařízení.

#### Přepětová ochrana

Označována OVP – Over Voltage Protection. Opět bývá buď pevně nastavena na hodnotu přibližně 105 až 110% napětíového rozsahu nebo je měnitelná.

#### Ochrana proti přetížení

Podobně jako předchozí dva typy ochran bývá i tato ochrana, označovaná OPP – Over Power Protection, nastavitelná nebo pevně daná na hodnotu o 5 až 10% vyšší než je nejvyšší dovolený ztrátový výkon zátěže.

#### Ochrana proti přepólování

Touto ochranou disponují pouze stejnosměrné zátěže. Bývá označována zkratkou RCP – Reverse Connection Protection. Zátěž tedy odpojí ve chvíli, kdy jí teče proud opačným než požadovaným

směrem, což nastane při záměně vstupních svorek.

## Ochrana proti zkratu

Uváděna pod zkratkou SCP – Short Circuit Protection, slouží k ochraně testovaného zařízení proti zkratu v průběhu testování.

## Ochrana proti přehřátí

Bývá označována zkratkou OTP – z anglického Over Temperature Protection, nebo OHP – Over Heat Protection. Tato ochrana chrání celé zařízení proti přehřátí. Senzor teploty bývá většinou umístěn na chladiči a odpojí celou zátěž pokud teplota chladiče přesáhne hodnotu mezi 90°C a 100°C. Někteří výrobci teplotní čidlo umísťují také ve vnitřním prostoru zařízení, nebo v místě proudění chladicího vzduchu či kapaliny. Poté je hodnota OTP nastavena např. na 50°C. Snímání teploty chladiče je však prováděno vždy, a to buď pomocí termistoru nebo termostatu.

## Ochrana proti poklesu napětí pod stanovenou mez

V katalogích výrobců ji lze nalézt pod zkratkou UVP – Under Voltage Protection nebo názvem Dropout Voltage. Tato ochrana neslouží k jištění zátěže, nýbrž testovaného zařízení – zejména akumulátorů. U nich může dojít k nevratnému poškození, pokud při procesu vybíjení dojde k poklesu napětí pod stanovenou mez (např. 0,8V pro akumulátor o napětí 1,2V). Tato ochrana tedy odpojí testovaný akumulátor a ukončí tím proces vybíjení. Bývá většinou nastavitelná v nižších hodnotách napětí, což je vyhovující právě pro akumulátory. U některých zátěží je však nastavitelná v celém rozsahu, tak aby případně mohla najít tato funkce větší uplatnění, například při testování napájecích zdrojů.

## Vnitřní ochrany

Někteří výrobci se ve svých katalogích chlubí také různými speciálními typy ochran, sloužících zejména k ochraně zátěže. Pro příklad lze uvést ochranu jednotlivých tranzistorů, kterou disponují zátěže společnosti AMREL. Jelikož jsou tranzistory řazeny v zátěži paralelně, hrozí při zničení jednoho tranzistoru řetězová reakce, kdy se velkým proudem postupně přetíží a zničí všechny tranzistory zapojené v modulu zátěže. Ochrana kontroluje každý jednotlivý MOSFET tranzistor, a měla by tedy řetězovou reakci zabránit [14].

### **3.7 Paralelní spojení zátěží**

Paralelním propojením zátěží dosáhneme zvýšení jejich mezních parametrů, tedy maximálního proudu a výkonového zatížení. Zátěže poté bývají namontovány ve společné skříně. Společné zapojení musí být provedeno vodiči dostatečně dimenzovanými na vyšší proud. Pomocí sběrnice pak dochází ke společnému řízení zátěží, tak aby byl mezi ně výkon rozložen rovnoměrně. Řízení je prováděno většinou na jedné zátěži, která se chová jako Master. Ostatní zátěže se poté chovají jako Slave – přejímají hodnoty nastavené na řídicí zátěži. Na řídicí zátěži také dochází k odečítání hodnot měřených parametrů. Počet zátěží, jež je možno takto paralelně spojit je většinou omezen na řádově jednotky kusů. Na obr.3.11 jsou příklady paralelního zapojení zátěží ve společné skříně.



Obr. 3.11 Paralelně propojené zátěže ve společné skříni

- a) zátěž nižšího výkonu
- b) výkoná zátěž

### 3.8 Propojení s PC

Většina elektronických zátěží umožňuje propojení s PC a tím efektivní měření, ukládání a zpracovávání naměřených dat. Některé zátěže je také možno přímo ovládat z počítače. Výrobce pak dodává k zátěžím i obslužný software ve kterém je možno přesně naprogramovat požadovaný průběh zatěžování testovaného zařízení. K propojení se používají nejčastěji rozhraní RS232, GPIB, CAN nebo USB. Ze softwarových produktů bývá podporováno například programování v prostředí Lab View, nebo výrobci dodávají své vlastní obslužné programy.

### 3.9 Další funkce elektronických zátěží

Elektronické zátěže obsahují ještě celou řadu funkcí, které slouží k přesnějšímu a pohodlnějšímu měření testovaných zařízení. Pro příklad je v následujícím textu popsáno několik takových funkcí, které se u zátěží různých výrobců vyskytují nejčastěji.

#### Current Monitor

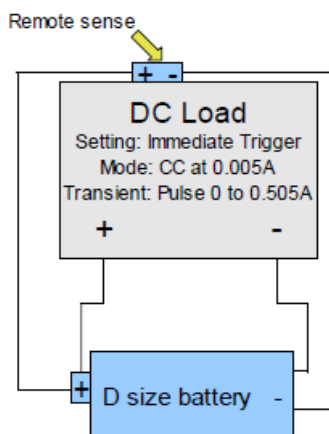
Jedná se o výstupní svorky na kterých je možno měřit napětí rovné zatěžovanému proudu. Toto napětí bývá v poměru řádově desítek nebo stovek milivolt na jeden ampér (například 50mV/A). Výhoda tohoto měření spočívá ve snadnějším zpracování naměřených hodnot. Ne vždy je možné zátěž propojit s PC a Current Monitor je pak jediná možnost jak snímat hodnotu zatěžovaného proudu. Tento výstup také dovoluje snímání průběhu proudu pomocí osciloskopu. V neposlední řadě je díky tomuto výstupu možné eliminovat nepřesnosti měření, které mohou vykazovat panelové měřicí přístroje elektronických zátěží.

#### Voltage Monitor

Jeho možnosti využití jsou podobné jako u výstupu Current Monitor. Uplatní se však spíše jen u vysokonapěťových zátěží.

## Remote Sense

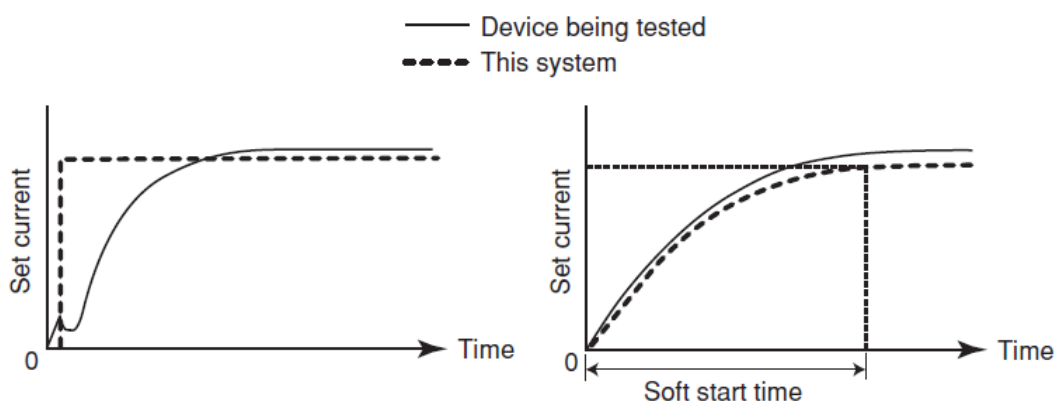
Tato funkce je u zátěží výhodná zejména při přesném měření zdrojů o malém napětí, které mají nízký vnitřní odpor a jsou tedy schopny dodávat vysoký proud (akumulátory, superkapacitory a podobně). Při takovém druhu testování se již uplatní přechodový odpor přívodních vodičů na kterých vznikne úbytek napětí a na vstupních svorkách zátěže bude tedy menší napětí než je skutečné napětí zdroje. Proto je vhodnější měřit napětí nezávisle. Toto se provádí přes vstup zvaný Remote Sense. Příklad použití při měření vnitřního odporu baterie je uveden na obr.3.12.



Obr. 3.12 Příklad použití funkce Remote Sense

## Soft Start Function

Na začátku zatěžování v normálním režimu zátěže, dojde ke vzrůstu požadovaného proudu skokově (obr.3.13a). To může mít nepříznivý vliv na vznik různých překmitů a celkově nemusí být pro testované zařízení tento ráz nejvhodnější, zvláště pokud se pohybujeme v oblasti vyšších proudů (viz. měření elektronické zátěže v kapitole 6.1.7). Proto některé zátěže nabízejí funkci tzv. měkkého startu, při kterém dochází k plynulému nárůstu požadovaného proudu (obr.3.13b), přičemž je nastavitelná doba nárůstu proudu na požadovanou hodnotu (Soft start time).



Obr. 3.13 Nárůst zatěžovaného proudu při připojení zátěže

- a) skokový nárůst požadovaného proudu
- b) funkce měkkého startu

## 4. Oblasti použití elektronických zátěží

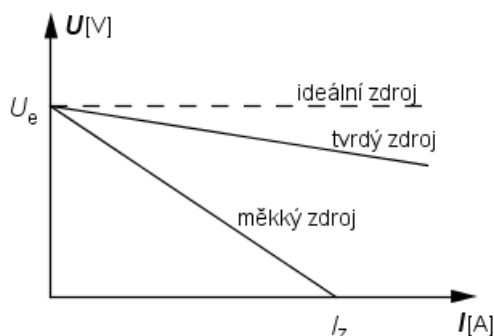
Elektronické zátěže jsou zařízení, které najdou široké uplatnění zejména v oblastech výzkumu a vývoje, výroby, vstupní a výstupní kontroly. Testovat lze snad všechny druhy zařízení, které jsou schopny dodávat či odebírat elektrickou energii – napájecími zdroji a akumulátory počínaje, elektromotory a polovodičovými součástkami konče. Způsob testování některých zařízení je uveden v následujícím textu. Prakticky pak bylo změřeno několik zařízení. Výsledky tohoto měření jsou diskutovány v kapitole 6.2.

### 4.1 Testování napájecích zdrojů

Testování napájecích zdrojů je jednou z hlavních oblastí využití elektronických zátěží. Testovat je možno nepřeberné množství různých zdrojů, které se vyskytují v podstatě ve všech elektrických zařízeních. Testují se zejména následující parametry napájecích zdrojů.

#### Výstupní charakteristika

Charakteristika udává závislost výstupního napětí zdroje na zatěžovaném proudu. Měření se provádí v režimu konstantního proudu. Příklad výstupní charakteristiky lze vidět na obr.4.1. U ideálního zdroje je charakteristika přímka rovnoběžná s proudovou osou. U reálných zdrojů přímka klesá – svorkové napětí se tedy se zvyšujícím odebíraným proudem snižuje. K čím menšímu poklesu dochází, tím je měřený zdroj kvalitnější.



Obr. 4.1 Výstupní charakteristika napájecího zdroje

#### Určení vnitřního odporu zdroje

Velikost vnitřního odporu zdroje se určí z hodnot naměřených při určování výstupní charakteristiky a vypočítá se dle vztahu:

$$R_i = \frac{U - U_e}{I_z} \quad (4.1)$$

kde:

$U$  je napětí zatíženého zdroje

$U_e$  je napětí zdroje naprázdno

$I_z$  je zatěžovaný proud

Ideální zdroj má tedy vnitřní odpor nulový. S jeho rostoucí hodnotou pak klesá tzv. tvrdost zdroje.



## Přepětová ochrana

Provádí se v režimu konstantního napětí s proudovým omezením výstupu zdroje, tak aby nedocházelo k vypínání jeho nadproudové ochrany. Na zátěži se postupně zvyšuje velikost konstantního napětí, dokud nedojde k vypnutí zdroje.

## Nadproudová ochrana

Provádí se v režimu konstantního proudu. Opět do hodnoty při které dojde k vypnutí napájecího zdroje.

## Ochrana proti zkratu

Většina elektronických zátěží umožňuje funkci „Short“, tedy stav simulující zkrat výstupních svorek testovaného zařízení. Touto funkcí lze tedy testovat rychlost odezvy pojistky napájecího zdroje.

## Maximální výkon zdroje

Provádí se v režimu konstantního výkonu. Zdroje většinou neobsahují ochranu proti překročení maximálního výkonu, je z nich tedy možné čerpat maximální výkon aniž by došlo k vypnutí zdroje. V oblasti nejvyššího výkonu však dochází k poklesu svorkového napětí

## Ochrana proti přehřátí

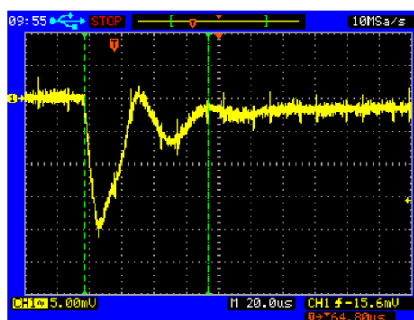
Provádí se v oblasti nejvyššího výkonu napájecího zdroje a lze jí určit účinnost chlazení.

## Vliv oteplení zdroje na jeho parametry

Po určité době zatěžování maximálním výkonem, kdy dojde k oteplení součástí napájecího zdroje, lze měřit vliv tohoto oteplení na parametry zdroje – například vnitřní odpor. Rozdíly by měly být pokud možno nejmenší.

## Rychlost ustálení napětí při skokové změně proudu

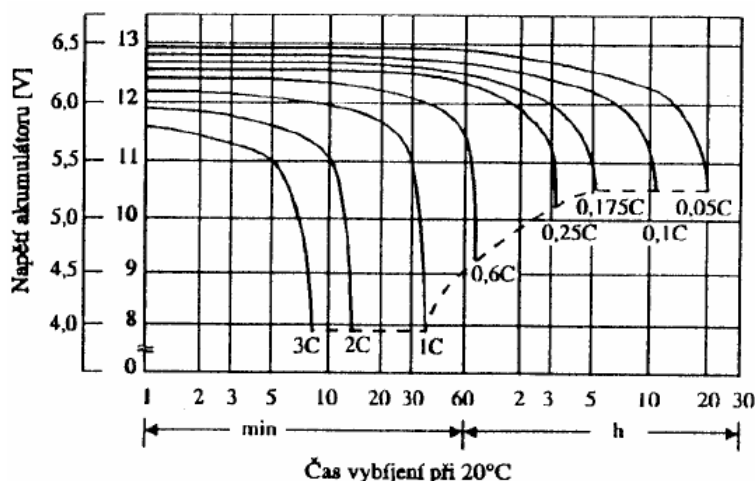
Důležitým parametrem napájecích zdrojů je časové odezva, charakterizovaná schopností zdroje zareagovat na náhlé změny zatěžování, tedy udržet hodnotu svorkového napětí při skokové změně odebíraného proudu. Pro měření tohoto parametru je nutné mít zátěž, která bude schopna velmi rychlé změny odebíraného proudu – musí mít tedy dobré dynamické vlastnosti. Na obr.4.2 je příklad takového měření, kdy při skokové změně zatěžovaného proudu dojde k mírnému rozkmitu napětí o cca.20mV. Tento rozkmit se ustálí za dobu asi 20μs.



Obr. 4.2 Průběh napětí zdroje při skokové změně odebíraného proudu

## 4.2 Testování akumulátorů

Základním parametrem, který se u akumulátorů měří, je tvar jeho vybíjecí charakteristika. Tato charakteristika nám poskytuje přehled o tom, jakým způsobem klesá hodnota svorkového napětí při konstantním zatěžování v čase. Její tvar se většinou zakresluje do systému logaritmických souřadnic v časové ose. Příklad takových vybíjecích charakteristik je na obr.4.3. Konstanta „C“ u křivky značí, jak velký vybíjecí proud byl pro dané měření použit. 2C tedy znamená vybíjecí proud dvojnásobné velikosti, než je kapacita akumulátoru.



Obr. 4.3 Vybíjecí charakteristiky akumulátoru

Mezi příklady dalších typů testování, které provádí výrobce a jež jsou uvedeny v [22] patří tyto zkoušky:

### Test kapacity

Akumulátory jsou vybíjeny proudem 0,3 CA (kde hodnota CA značí velikost proudu rovnu kapacitě akumulátoru v ampérhodinách. Pro akumulátor o kapacitě 15Ah bude tedy testování prováděno proudem  $I = 0,3 \cdot 15 = 4,5A$ ). Po 120 minutách nepřetržitého vybíjení nesmí být napětí zatíženého akumulátoru menší než 1,75V na článek

### Test velkým zatěžovacím proudem

Akumulátor je zatížen proudem 2 CA po dobu 5 sekund. Po tuto dobu je snímáno svorkové napětí akumulátoru, které nesmí být nižší než 1,75V na článek.

### Test kapacity při střední zátěži

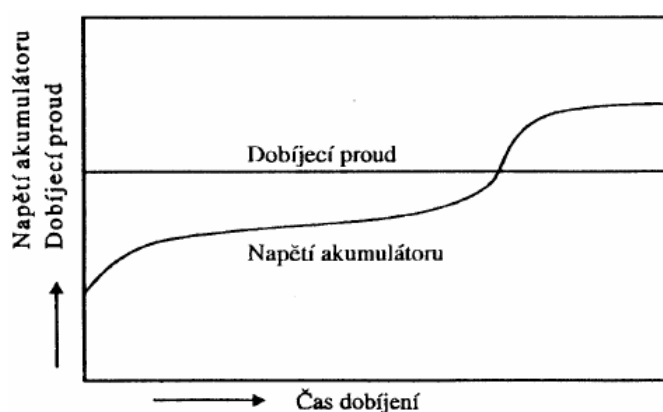
Akumulátor je plně nabit a následně vybíjen proudem 0,2 CA do konečného napětí 1,7V na článek. Doba vybíjení nesmí být menší než 4 hodiny.

### Test kapacity vysokým zatížením

Plně nabitý akumulátor je vybíjen proudem 2 CA do konečného napětí 1,35V na článek. Doba vybíjení musí být alespoň 12 minut.

### 4.3 Testování nabíječek akumulátorů

Nabíječka akumulátorů je vlastně proudový napájecí zdroj. Průběh napětí na akumulátoru při procesu nabíjení je vykreslen na obr.4.5 [22]. Nabíječka tedy musí být schopna dodávat konstantní proud při změnách napětí v čase. Například pro olověný akumulátor je při začátku nabíjení napětí 1,9V na článek, při konci nabíjecího procesu pak 2,8V. Přičemž celý proces nabíjení může trvat několik hodin. Po celou tuto dobu musí být nabíječka schopna dodávat konstantní proud, jehož velikost by měla být rovna 1/10 kapacity akumulátoru (tedy např. pro autobaterii o kapacitě 60Ah musí být proud 6A). Levnější, méně kvalitní nabíječky nemusí být schopny tento proud konstantně udržet. Také u nich nemusí být nastaveno přesné vypínání při maximálním nabití akumulátoru a tím řádné ukončení nabíjecího procesu. Poté hrozí přebití akumulátoru. Tyto vlastnosti je možno otestovat pomocí elektronické zátěže v režimu konstantního napětí.



Obr. 4.5 Průběh napětí na akumulátoru při nabíjení konstantním proudem

Kvalitnější nabíječky akumulátorů jsou schopny pracovat v různých nabíjecích režimech. Udávají se 3 základní nabíjecí charakteristiky:

- 1) Charakteristika U – nabíjení konstantním napětím a vysokým proudem (roven až kapacitě akumulátoru) při začátku nabíjení
- 2) Charakteristika I – dobíjení konstantním proudem (popsáno výše)
- 3) Charakteristika W – dobíjení se zvyšujícím se napětím a klesajícím proudem

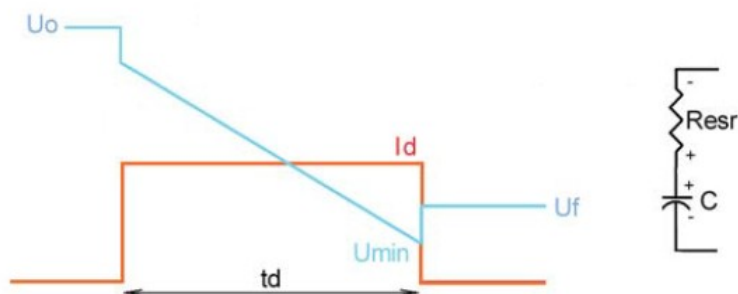
Všechny tyto charakteristiky, ale i různé další nabíjecí režimy, je možno pomocí elektronické zátěže v režimu CC, CV nebo CP u nabíječek otestovat.

### 4.4 Testování superkapacitorů

Superkapacitor (používají se i názvy ultrakapacitor nebo dvouvrstvý elektrochemický kondenzátor) je v principu elektrolytický kondenzátor vyrobený speciální technologií za účelem dosažení vysoké kapacity řádu tisíců Faradů při zachování vlastností kondenzátoru, zejména schopnosti rychlého nabíjení a vybíjení.

Pro testování lze vyjít například z doporučení výrobce MAXWELL uvedených v [19]. Nejčastější je způsob testování superkapacitorů v režimu nabíjení i vybíjení konstantním proudem. Při nabíjení

nesmí být napětí zdroje vyšší než maximální dovolené napětí superkapacitoru. Nabíjecí proud je omezen pouze parametry zdroje ze kterého se nabíjení provádí. Vybíjení se doporučuje konstantním proudem nastaveným na 20% až 50% maximální hodnoty. Vybíjecí charakteristika (uvedena na obr.4.6) by měla být lineární, přičemž na počátku vybíjení dojde ke skokovému poklesu napětí. Vybíjení se provádí až na napětí 0,1V nebo na napětí rovné polovině počátečního napětí. Po odpojení zátěže napětí po několika sekundách opět mírně vzroste.



Obr. 4.6 Vybíjecí charakteristika superkapacitoru

Na charakteristice jsou vyznačeny tyto hodnoty:

$U_0$  – počáteční napětí na superkapacitoru

$U_{\min}$  – minimální napětí na superkapacitoru s připojenou zátěží

$U_f$  – napětí na superkapacitoru 5 sekund po odpojení zátěže

$I_d$  – vybíjecí proud

$t_d$  – čas vybití superkapacitoru z napětí  $U_0$  na napětí  $U_f$

Z naměřených hodnot lze vypočítat tyto parametry superkapacitoru:

Kapacitu:

$$C = \frac{I_d \cdot t_d}{U_0 - U_f} \quad (4.2)$$

Ekvivalentní stejnosměrný sériový odpor:

$$R_{esr} = \frac{U_f - U_{\min}}{I_d} \quad (4.3)$$

Uložená energie:

$$E = \frac{1}{2} C \cdot U_0^2 \quad (4.4)$$

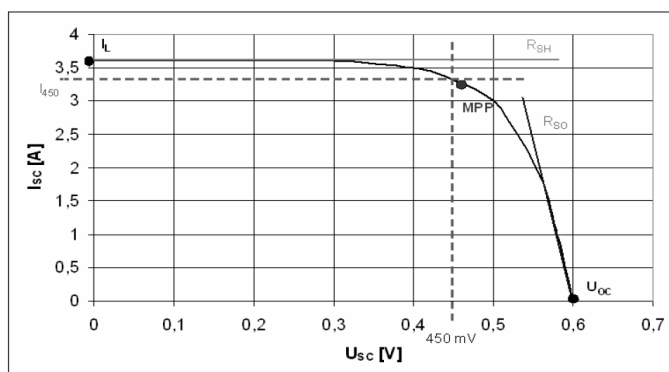
Dodaná energie

$$\Delta E = \frac{1}{2} C \cdot (U_0^2 - U_f^2) \quad (4.5)$$

U superkapacitorů se dále měří a testuje spousta dalších parametrů. Například doba jejich životnosti, tedy vliv počtu nabíjecích cyklů na velikost kapacity, nebo se provádí různá pulsní měření simulující činnost superkapacitoru v praktických aplikacích [18].

## 4.5 Testování fotovoltaických článků

Také při měření parametrů fotovoltaických článků je pro posouzení jejich kvality nejvhodnější určení volt-ampérové charakteristiky. Její příklad je uveden na obr.4.7. V charakteristice jsou definovány významné body, které lze pomocí elektronické zátěže snadno určit [21].



Obr 4.7 Volt-ampérová charakteristika fotovoltaického článku

### Proud nakrátko (zkratový) – $I_L$

Maximální proud, jenž může PV článek dodávat při daném osvětlení a nulovém napětí

### Maximální výkon - MPP

Bod udávající na VA charakteristice maximální výkon. Určí se z napětí a proudu při němž dodává článek maximální výkon

### Proud $I_{450}$

Proud při napětí  $U = 450$  mV. Slouží k pohodlnějšímu odhadnutí polohy bodu MPP.

Dalšími parametry, které slouží k popsání vlastností fotovoltaických článků je napětí naprázdno, činitel plnění, účinnost, sériový a paralelní odpor a další.

## 4.6 Testování dalších zařízení

### Testování palivových článků

Podobně jako při testování fotovoltaických článků, je nejdůležitějším kritériem testování určení volt-ampérové charakteristiky a významných bodů, které na této charakteristice leží.

### Testování budičů výkonových LED

Pro tato zařízení se používá testování v režimu konstantního napětí nebo konstantního odporu, který nejlépe simuluje chování výkonových LED diod, tedy diferenciální odpor v propustném stavu diody.

### Testování UPS

Při testování záložních zdrojů UPS se elektronická zátěž uplatní zejména při testování v dynamickém režimu, kdy se ověří odolnost UPS proti induktivní zátěži. Dále je možno měřit různé

parametry akumulátoru tohoto záložního zdroje.

## Testování polovodičových součástek

Elektronická zátěž se také uplatní při určování volt-ampérových charakteristik a mezních parametrů různých polovodičových součástek – diod, tranzistorů nebo tyristorů.

## 5. Návrh a realizace elektronické zátěže

Pro návrh elektronické zátěže byly zejména využity literární zdroje, kde jsou uvedeny návrhy různých elektronických zátěží [5], [6], [7], [8] a popsány funkce různých elektronických obvodů, zejména s operačními zesilovači [1], [2]. Jako inspirace dále posloužily údaje z katalogů různých světových výrobců elektronických zátěží.

### 5.1 Hlavní parametry zátěže

Byly stanoveny tyto hlavní parametry zátěže:

Maximální dovolené napětí: 200V

Maximální proud zátěží: 40A

Maximální ztrátový výkon: 400W

Maximální dovolené napětí je dáno konstrukcí zátěže, tedy zejména použitými konektory a kabeláží, které mají nejvyšší napětí 250V. Maximální proud je dán použitými tranzistory, ale omezení je také u vstupních konektorů, jež jsou konstruovány na maximální proud 50A. Maximální ztrátový výkon je pak omezen použitým chladičem a způsobem chlazení.

Elektronická zátěž umožňuje provoz ve čtyřech základních režimech u nichž je možno nastavit hodnotu konstantního parametru:

Režim konstantního proudu CC – 0 až 40A

Režim konstantního napětí CV – 0 až 200V

Režim konstantního odporu CR – 0,5 až 10 $\Omega$

Režim konstantního výkonu CP – 0 až 400W

Systém ochran zajišťuje:

Ochranu proti přepětí OVP – pevně nastavena na 200V

Ochranu proti nadproudu OCP – nastavitelná v rozmezí 1A až 40A

Ochranu proti výkonovému přetížení OPP – pevně nastavena na 400W

Ochranu proti poklesu napětí UVP – nastavitelná v rozmezí 0,8V až 12V

Ochranu proti přehřátí OTP – zapnutí aktivního chlazení při teplotě 50°C, odpojení zátěže při 90°C

Ochrana proti přepólování RCP

Další parametry zátěže:

Napájení 230V/50Hz přes univerzální PC konektor

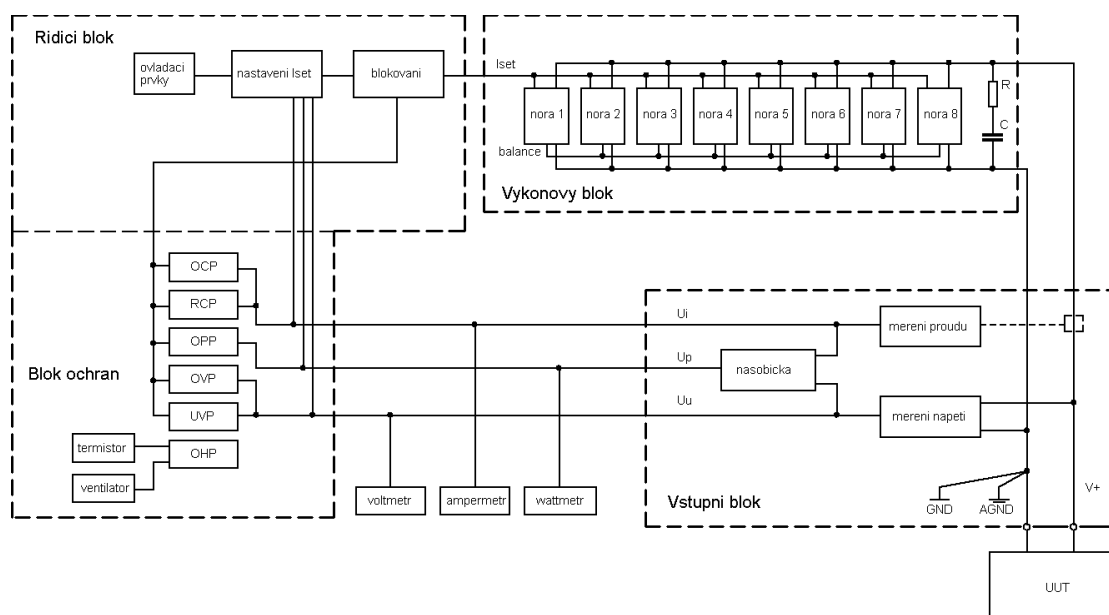
Výstup Current Monitor pro měření odebíraného proudu

Vstupní konektor pro připojení signálu z generátoru

Zobrazení hodnot napětí, proudu a výkonu na 3 a ½ místných panelových měřidlech

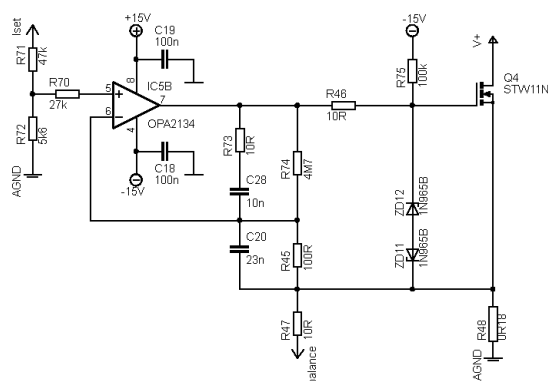
Tlačítko pro připojení a odpojení zátěže usnadňující testování

Blokové schéma elektronické zátěže je uvedeno na obr.5.1. Celková schémata a nákresy desek plošných spojů je možno najít v příloze.



## 5.2 Výkonový blok

Stěžejním blokem elektronické zátěže, který nejvíce určuje její parametry, je výkonový blok. Tento blok sestává z osmi proudových nor. Každá proudová nora obsahuje tři základní prvky - výkonový MOSFET tranzistor, výkonový sledovací rezistor a operační zesilovač. Je použit výkonový tranzistor STW11NK100Z společnosti STMicroelectronics. Jeho základní parametry jsou:  $U_{DS} = 1000V$ ;  $I_D = 8,3A$ ;  $P_w = 230W$  [23]. Pokud uvažujeme maximální parametry zátěže popsané v předchozí kapitole, vychází nám, že každým tranzistorem poteče proud maximálně 5A a bude na něm nejvyšší výkonová ztráta 50W. Parametry tranzistoru tedy nebudou využity na sto procent a bylo by možné použít pouze 6 tranzistorů. Řešení s osmi tranzistory nám však zajistí vyšší spolehlivost, lepší odvod tepla a nižší vstupní odpor zátěže. Na chladiči a DPS výkonového bloku je také dostatek místa a nárůst ceny je oproti ceně celého zařízení zanedbatelný. Proto je vhodnější zapojení s osmi tranzistory – tedy osmi proudovými norami. Ve funkci neinvertujícího zesilovače je použit precizní nízkošumový operační zesilovač OPA2134 společnosti Burr-Brown. Jeho zkreslení je 0,00008%, má velmi nízký šum  $8nV/\sqrt{Hz}$ , nízký vstupní proud  $I_B = 5pA$ , a rychlost přeběhu  $20V/\mu s$ . Také vykazuje dobré tepelné vlastnosti [24]. Na místě sledovacích rezistorů jsou použity rezistory o výkonu 5W. Schéma zapojení jedné proudové nory je na obr.5.2.



Obr. 5.2 Schéma zapojení proudové nory



Na neinvertující vstup OZ se přes odporový dělič R71, R72 přivádí řídicí napětí. Poměry v děliči lze nastavit maximální výstupní napětí OZ, kterým se řídí velikost otevření tranzistoru a tím i proud odebíraný zátěží. Dělič je tedy nastaven tak, aby při nejvyšším řídicím proudu  $I_{set}$  byl proud tekoucí jedním tranzistorem  $I_D = 5A$ . Do invertujícího vstupu je zavedeno zpětovazební napětí, jehož velikost je úměrná úbytku napětí na sledovacím rezistoru R48. Úbytek napětí je dán velikostí zatěžovaného proudu.

Tranzistory MOSFET tvoří pro výstup OZ zátěž kapacitního charakteru, kterou je potřeba kompenzovat. K tomu slouží kondenzátory C20 a C28. Tyto kapacitory také zabráňují rozkmitání obvodu při změně parametrů a dynamickém režimu zátěže.

Zenerovy diody ZD11 a ZD12 o Zenerově napětí 15V slouží k ochraně výstupu operačního zesilovače. Rezistor R75 přivádí záporné napětí na gate Q4 a tím jej spolehlivě uzavírá, pokud není na výstupu OZ žádné napětí. Přes rezistor R47 a svorku označenou „balance“ jsou jednotlivé proudové nory propojeny mezi sebou, čímž je zajištěna jejich rovnováha. Zatěžovaný proud by tedy měl téct rovnoměrně přes všech osm tranzistorů. Toto bylo dokázáno měřením jehož výsledky jsou uvedeny v tabulce 5.1.

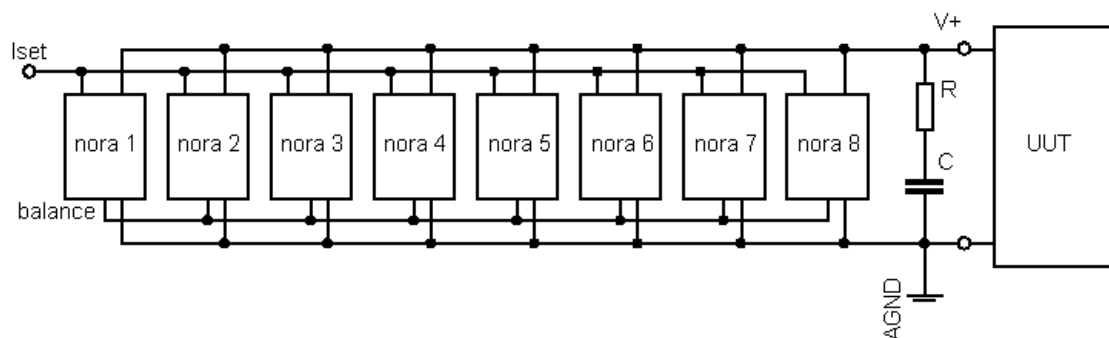
	číslo OZ	$U_{R_s}$ (V)	$I_{R_s}$ (A)
nora č.1	IC3	0,1736	0,9644
nora č.2		0,1732	0,9622
nora č.3	IC5	0,1837	1,0206
nora č.4		0,1838	1,0211
nora č.5	IC7	0,1731	0,9617
nora č.6		0,1733	0,9628
nora č.7	IC10	0,1839	1,0206
nora č.8		0,1838	1,0211
Celkový proud $\sum I_{R_s}$ (A)			7,9344

Tabulka 5.1 Rozložení proudu mezi jednotlivé proudové nory

Rozdíl mezi velikostmi proudů tekoucích jednotlivými norami je tedy minimální. Nejvyšší rozdíl je 60mA což činí pouze 0,75% z celkového proudu.

V proudové noře jsou od sebe odděleny výkonová zem a zem napájecího zdroje. Tyto jsou spojeny jen v jednom bodě a to hned v místě připojení zatěžovaného zařízení – ve vstupním bloku.

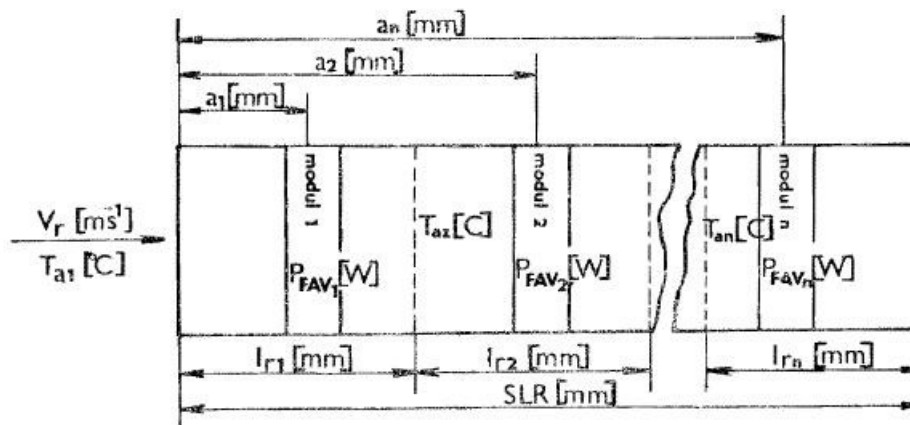
Způsob zapojení všech osmi proudových nor, a tedy i blokové schéma celého výkonového bloku, je na obr.5.3. Na vstupu celého bloku je ještě zapojen filtrační RC článek, který také odstraní nežádoucí zákmitý vzniklé na sledovacích rezistorech vybíjením kapacit  $C_{GS}$  tranzistorů MOSFET.



Obr. 5.3 Blokové schém výkonového bloku

### 5.2.1 Výpočet chladiče

Nejdůležitějším parametrem při konstrukci elektronické zátěže je určení ztrátového výkonu, který je zátěž schopná odebírat z testovaného zařízení. Tento výkon se ve sledovacích rezistorech a zejména výkonových MOSFET tranzistorech mění na teplo, které se přes chladič předává okolnímu prostředí. Je tedy nutné použít tranzistory s dostatečně velkým ztrátovým výkonem a dostatečně dimenzovaný chladič, který bude schopen výkon uchladit. Maximální ztrátový výkon 400W byl stanoven s využitím metodiky výpočtu nuceného chlazení bezpotenciálových modulů pro chladiče dodávané společností ČKD Power Electronics [27]. Metodika se používá pro výpočet chladičů na něž jsou namontovány rozměrově přesně odpovídající výkonové moduly vyráběné stejnou společností. Postup výpočtu lze však použít i pro jiné výkonové součástky. Obecný způsob rozložení modulů na chladiči je naznačen na obr.5.4. Jeden modul reprezentuje vždy dvojice MOSFET tranzistorů umístěných příčně vedle sebe. Při výkonu 400W vychází ztráta na jednom tranzistoru 50W. Ztrátový výkon jednoho modulu bude tedy  $P_{FAV} = 100W$



Obr. 5.4 Obecné rozložení bezpotenciálových modulů na chladiči

Pro metodiku výpočtu je nutné dále znát vnitřní tepelný odpor modulu. Ten je dán paralelním řazením tepelných odporů dvou tranzistorů. Z katalogových údajů lze vyčíst odpor jednoho tranzistoru  $0,54K/W$ , pro jeden modul tedy  $R_{th(j-c)} = 0,27K/W$ . Stykový tepelný odpor mezi modulem a chladičem je  $R_{th(c-h)} = 0,075K/W$ . Maximální pracovní teplota přechodu pak je

$T_j = 150^\circ C$ . Při výpočtech dále použijeme tabulkovou hodnotu volného průřezu chladiče  $A_{rv} = 0,0057712 m^2$ .

Pro nucené chlazení je použit ventilátor s průtokem vzduchu  $Q_v = 0,05474 m^3/s$  a velikosti 120mm x 120mm [25]. Přibližně tedy uvažujeme proudění tímto čtvercovým průřezem a rychlost tedy bude dána vztahem:

$$v = \frac{Q_v}{S} = \frac{0,05474}{0,12 \cdot 0,12} = 3,802 m/s \quad (5.1)$$

Rychlost proudění v celém zařízení a u žebër chladiče bude podstatně nižší. Proto pro výpočet chladiče použijeme koeficienty regresní funkce z tabulky pro metodiku výpočtu odpovídající rychlosti proudění 2m/s. Koeficienty jsou:

$$A = 31,4373$$

$$B = -1,1203$$

$$C = 0,1910$$

Dále je třeba znát teplotu vzduchu před n-tým chladicím dílem. Před prvním chladicím dílem bude teplota vzduchu rovna pokojové teplotě.

$$\underline{T_{a1} = 25^\circ C}$$

Před dalšími chladicími díly se bude teplota postupně zvyšovat.

$$T_{a2} = \frac{8,3333 \cdot 10^{-4}}{A_{rv} \cdot v_r} \cdot P_{FA1} + T_{a1} = \frac{8,3333 \cdot 10^{-4}}{0,0057712 \cdot 2} \cdot 100 + 25 = \underline{\underline{32,22^\circ C}} \quad (5.2)$$

$$T_{a3} = \frac{8,3333 \cdot 10^{-4}}{A_{rv} \cdot v_r} \cdot (P_{FA1} + P_{FA2}) + T_{a1} = \frac{8,3333 \cdot 10^{-4}}{0,0057712 \cdot 2} \cdot 200 + 25 = \underline{\underline{39,44^\circ C}} \quad (5.3)$$

$$T_{a4} = \frac{8,3333 \cdot 10^{-4}}{A_{rv} \cdot v_r} \cdot (P_{FA1} + P_{FA2} + P_{FA3}) + T_{a1} = \frac{8,3333 \cdot 10^{-4}}{0,0057712 \cdot 2} \cdot 300 + 25 = \underline{\underline{46,66^\circ C}} \quad (5.4)$$

V závislosti se zvyšující se teplotou před jednotlivými díly, budou klesat tepelné odpory jednotlivých chladicích dílů.

$$R_{th(h-a)1} = \frac{T_{j1} - T_{a1}}{P_{FAV1}} - R_{th(c-h)1} - R_{th(j-c)1} = \frac{150 - 25}{100} - 0,075 - 0,27 = \underline{\underline{0,905 K/W}} \quad (5.5)$$

$$R_{th(h-a)2} = \frac{T_{j2} - T_{a2}}{P_{FAV2}} - R_{th(c-h)2} - R_{th(j-c)2} = \frac{150 - 32,22}{100} - 0,075 - 0,27 = \underline{\underline{0,8328 K/W}} \quad (5.6)$$

$$R_{th(h-a)3} = \frac{T_{j3} - T_{a3}}{P_{FAV3}} - R_{th(c-h)3} - R_{th(j-c)3} = \frac{150 - 39,44}{100} - 0,075 - 0,27 = \underline{\underline{0,7606 K/W}} \quad (5.7)$$

$$R_{th(h-a)4} = \frac{T_{j4} - T_{a4}}{P_{FAV4}} - R_{th(c-h)4} - R_{th(j-c)4} = \frac{150 - 46,66}{100} - 0,075 - 0,27 = \underline{\underline{0,6884 K/W}} \quad (5.8)$$

V závislosti na tepelném odporu jednotlivých dílů a s použitím koeficientů regresní funkce určíme rozestupy mezi jednotlivými moduly.

$$l_{r1} = \left[ \frac{R_{th(h-a)1} - C}{A} \right]^{1/B} = \left[ \frac{0,905 - 0,1910}{31,4373} \right]^{1/-1,1203} = \underline{\underline{29,33mm}} \quad (5.9)$$

$$l_{r2} = \left[ \frac{R_{th(h-a)2} - C}{A} \right]^{1/B} = \left[ \frac{0,8328 - 0,1910}{31,4373} \right]^{1/-1,1203} = \underline{\underline{32,25mm}} \quad (5.10)$$

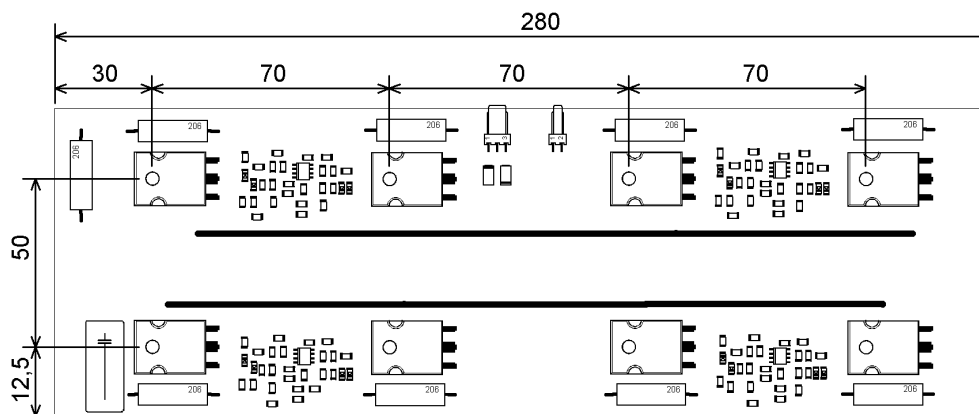
$$l_{r3} = \left[ \frac{R_{th(h-a)3} - C}{A} \right]^{1/B} = \left[ \frac{0,7606 - 0,1910}{31,4373} \right]^{1/-1,1203} = \underline{\underline{35,88mm}} \quad (5.11)$$

$$l_{r4} = \left[ \frac{R_{th(h-a)4} - C}{A} \right]^{1/B} = \left[ \frac{0,6884 - 0,1910}{31,4373} \right]^{1/-1,1203} = \underline{\underline{40,49mm}} \quad (5.12)$$

Nejmenší možný rozestup mezi moduly tedy vychází přibližně 3 až 4cm. Teoreticky by tedy bylo možné použít chladič o délce přibližně 16cm. Společnost ČKD dodává chladiče o délce 14cm a 28cm, použijeme tedy ten delší.

Podle výpočtů vychází v rozměru poměrně velká rezerva. Vystala tedy otázka zda by bylo možné výkon ještě zvýšit. Při propočtech s uvažováním výkonu 500W však již vychází rozestup modulů podstatně větší a do délky 28cm by se tyto již nevešly.

Skutečné rozmístění tranzistorů na desce výkonového bloku a tedy jejich rozmístění na chladiči je uvedeno na obr.5.5.



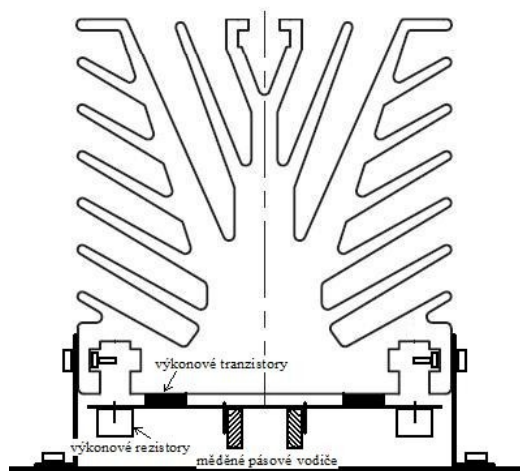
Obr. 5.5 Rozmístění tranzistorů na desce výkonového bloku

Výkonová ztráta na tranzistorech bude o něco nižší než uvažovaných 50W na jeden tranzistor, jelikož se část výkonu trátí také na výkonových sledovacích rezistorech. Při maximálním zatěžovacím proudu 40A teče každým tranzistorem proud 5A, který způsobí na sledovacím rezistoru ztrátu:

$$P = I^2 \cdot R = 5^2 \cdot 0,18 = 4,5W \quad (5.13)$$

Toto je nejvyšší výkon který se na rezistorech ztratí. Při nižších proudech bude ztráta také nižší. Použity jsou tedy rezistory o výkonu 5W, které jsou v desce plošného spoje osazeny podélně ve směru proudění vzduchu, tak aby jejich chlazení bylo co nejúčinnější.

Způsob jakým je deska plošného spoje výkonového bloku připojena k chladiči a jakým způsobem je celý tento výkonový blok zabudován v zařízení, je uvedeno na obr.5.6.



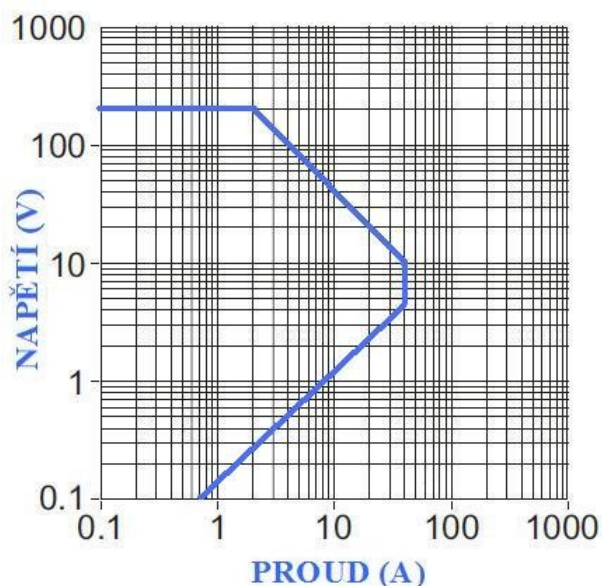
Obr. 5.6 Připojení výkonového bloku k chladiči

Deska plošného spoje je osazena oboustranně. Tranzistory jsou umístěny na spodní straně směrem k chladiči, zatímco operační zesilovače a pasivní prvky operační sítě osazené SMD součástkami jsou na horní straně. Stejně tak i výkonové rezistory. Operační zesilovače a prvky k nim přidružené jsou umístěny mimo výkonové tranzistory a rezistory, tak aby na ně bylo tepelné působení co možná nejmenší (obr.5.5). Středem plošného spoje vedou silné měděné pásové vodiče (tzv. šíny) o průřezu  $60\text{mm}^2$ , které zajišťují minimální odpor a co nejnížší úbytek napětí a tím rovnoměrné rozložení zatěžovaného proudu mezi jednotlivé proudové nory. V pásovéch vodičích jsou vyřezány závity pro snadnější montáž a demontáž přívodních vodičů.

Správnost výpočtů chlazení byla ověřena měřením. Toto měření účinnosti chlazení je uvedeno v kapitole 6.1.1.

### 5.3 Pracovní oblast

Jak již bylo definováno a vypočteno v předchozích kapitolách, jsou mezní parametry elektronické zátěže:  $U_{MAX} = 200V$ ,  $I_{MAX} = 40A$ ,  $P_{MAX} = 400W$ . Tyto mezní parametry lze zakreslit do grafu na obr.5.7 a tím definovat pracovní oblast zátěže.



Obr. 5.7 Pracovní oblast elektronické zátěže

Pracovní oblast je tedy omezena jednak shora, maximálními parametry zvolenými při vývoji zařízení, a jednak zdola, parazitními parametry. Těmito parazitními parametry se rozumí nejnížší možné napětí při kterém je zátěž schopná odebírat proud z testovaného zařízení. Toto nejnížší napětí závisí na vnitřním odporu zátěže, který je dán odporem jednotlivých proudových nor, tedy sledovacích odporů a odporů  $R_{DS}$  otevřených tranzistorů, řazených paralelně. Jelikož je v zátěži zapojeno celkem osm tranzistorů a osm výkonových sledovacích rezistorů, je vnitřní odpor dán následujícím vztahem:

$$\frac{1}{R_i} = \frac{1}{R_{DS1} + R_{S1}} + \frac{1}{R_{DS2} + R_{S2}} + \dots + \frac{1}{R_{DS8} + R_{S8}} \quad (5.14)$$

Podle katalogového listu tranzistoru STW11NK100Z [23] dosahuje odpor mezi kolektorem a emitorem otevřeného tranzistoru hodnoty  $R_{DS} = 1,1\Omega$ . Hodnota je závislá na proudu, který protéká tranzistorem, a zejména pak na teplotě čipu výkonového tranzistoru. S proudem i teplotou odpor roste a při  $150^\circ C$  dosahuje velikosti až  $2,5\Omega$ . Ve výpočtu však použijeme tabulkovou hodnotu  $1,1\Omega$  definovanou při teplotě  $25^\circ C$ . Dále jsou symboly  $R_{S1}$  až  $R_{S8}$  ve vztahu (5.14) označeny sledovací odpory zapojené mezi emitorem tranzistoru a zemí. Tyto mají velikost  $0,18\Omega$ . Po úpravě a dosazení tedy:

$$\frac{1}{R_i} = 8 \cdot \left( \frac{1}{R_{DS} + R_S} \right) = 8 \cdot \left( \frac{1}{1,1 + 0,18} \right) = 6,25 \rightarrow \underline{\underline{R_i = 0,16\Omega}} \quad (5.15)$$

Podle ohmova zákona určíme, že nejvyšším dovoleným proudem 40A lze zatěžovat zdroje s napětím vyšším než  $U = I \cdot R_i = 40 \cdot 0,16 = 6,4V$ . Hodnota nejnižšího dovoleného napětí je zakreslena do pracovní oblasti zátěže, uvedené na obr.5.7 a omezuje charakteristiku zdola. Výpočtem lze také určit, že například akumulátor o napětí 1,5V lze nejvýše zatížit proudem

$$I = \frac{U}{R_i} = \frac{1,5}{0,16} = 9,4A.$$

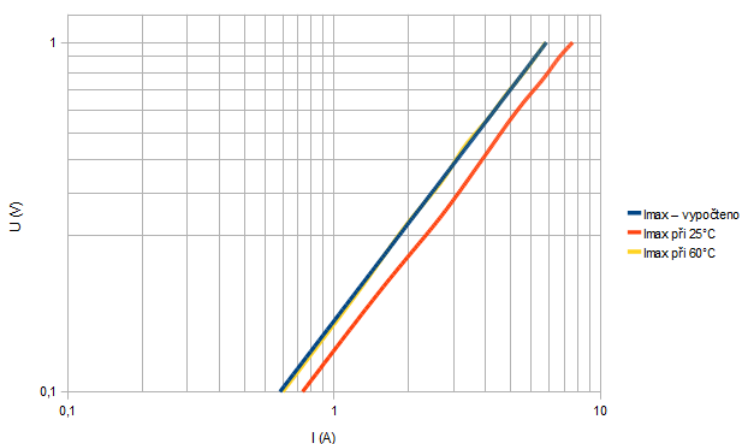
Tato hodnota však nebude zcela jednoznačná, a jak již bylo zmíněno, bude

vzhledem ke změnám odporů  $R_{DS}$  záviset na teplotě. Jak se toto dolní omezení přesně projeví u realizované zátěže, bylo ověřeno měřením. Z napájecího zdroje byl při napětí 0,1V až 1V odebrán nejvyšší možný proud. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 5.2. Měření bylo také provedeno při teplotě pouzder tranzistorů přibližně 60°C.

$U_Z$ (V)	$I_{\max}$ (A) vypočteno	$I_{\max}$ (A) při 25°C	$I_{\max}$ (A) při 60°C
0,1	0,63	0,76	0,64
0,2	1,25	1,53	1,27
0,3	1,88	2,37	1,86
0,4	2,50	3,14	2,53
0,5	3,13	3,86	3,06
0,6	3,75	4,57	3,74
0,7	4,38	5,35	4,35
0,8	5,00	6,19	5,02
0,9	5,63	6,93	5,64
1,0	6,25	7,84	6,21

Tabulka 5.2 Měření nejvyššího proudu zátěží při nízkých napětích

Měřená charakteristika je pak zanesena do grafu na obr.5.8 pro porovnání s vypočtenou hodnotou. Z tabulky je patrné, že hodnoty naměřené při 60°C jsou téměř totožné s vypočtenou hodnotou (křivky se tedy v grafu překrývají) kdežto hodnoty při 25°C se liší. Přitom by tomu mělo být právě naopak. Velikost odporu je v katalogovém listu tranzistoru uvedena 1,1Ω při 25°C jednak číselně, ale i graficky. Přitom podle zpětného propočtu podle vztahu 5.14 vychází odpor  $R_{DS}$  jednoho tranzistoru při 25°C cca.0,85Ω. Minimální hodnota není v katalogovém listu udána. Jediným vysvětlením může být snad jen to, že výrobce udává v katalogovém listu údaje s jistou rezervou, tak aby byly platné i pro nejhůře vyrobené kusy.



Obr. 5.8 Pracovní oblast zátěže při nejnižších napětích

Přesto byl však splněn předpoklad, že s rostoucí teplotou odpor  $R_{DS}$  roste a tím klesá minimální napětí při němž lze zátěži odebrat požadovaný proud.

Do celkové pracovní charakteristiky na obr.5.7 byla zakreslena přímka naměřená při teplotě 25°C. Z této přímky lze určit, že nejvyšším možným proudem 40A lze zatěžovat zdroj o napětí 4,5V.

Pro porovnání pracovní charakteristiky navržené elektronické zátěže se zátěžemi dostupnými na trhu, se lze vrátit ke kapitole 3.4.

## 5.4 Vstupní blok

Na vstupu elektronické zátěže je umístěn vstupní blok, který slouží ke zpracování tří základních elektrických veličin – tedy napětí, proudu a výkonu. Tyto tři veličiny jsou převáděny na elektrická napětí nízké úrovně, jež je možné dále zpracovávat v řídicím bloku, jak je také naznačeno na blokovém schématu celé zátěže na obr.5.1. Elektrické veličiny se převádí v následujících poměrech:

$$\text{Vstupní napětí: } U_U = \frac{1}{20} U_{IN} = 50mV / V \quad (5.16)$$

$$\text{Vstupní proud: } U_I = \frac{1}{10} I_{IN} = 100mV / A \quad (5.17)$$

$$\text{Ztrátový výkon: } U_P = \frac{1}{100} P_Z = 10mV / W \quad (5.18)$$

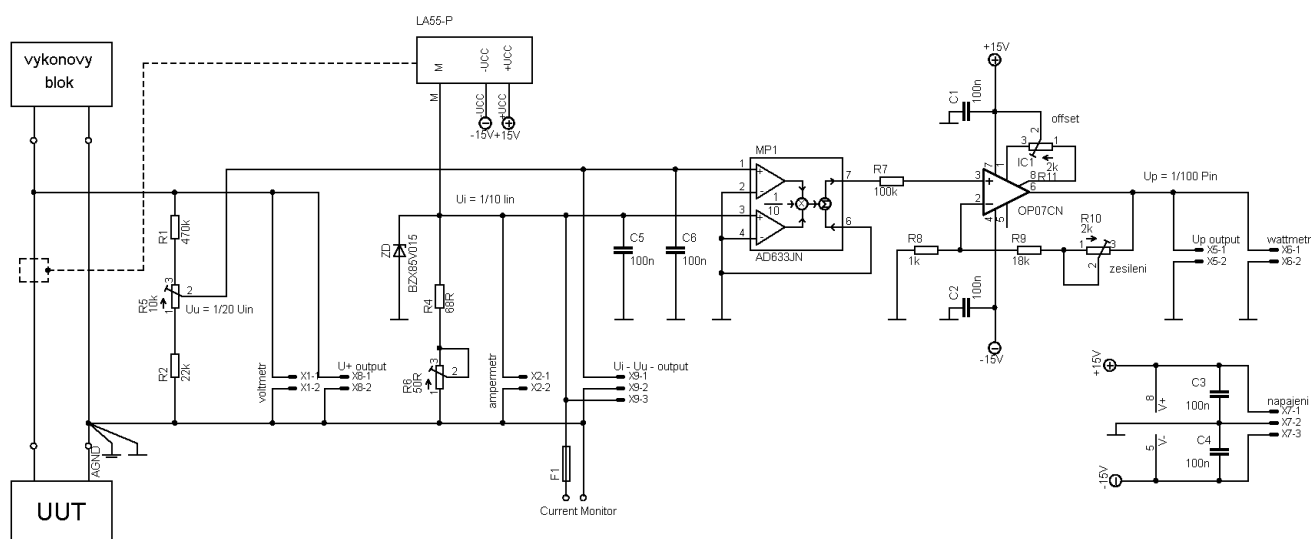
Kde  $U_U$ ,  $U_I$  a  $U_P$  značí nízká elektrická napětí s nimiž se dále pracuje. V poměru k maximálním parametrům zátěže se tedy tato sledovací napětí budou pohybovat v rozmezích:

$$U_U = 0 \div 10V$$

$$U_I = 0 \div 4V$$

$$U_P = 0 \div 4V$$

Jak jsou tato napětí získávána je patrné ze schématu zapojení celého vstupního bloku, který je na obr.5.9.



Obr. 5.9 Schéma zapojení vstupního bloku



## Sledovací napětí $U_U$

Získává se nejjednodušším způsobem přes odporový dělič  $R_1$ ,  $R_2$  a trimr  $R_5$ , kterým lze sledovací napětí doladit na přesnou dvacetinu napětí vstupního. Napětí je filtrováno kondenzátorem  $C_6$  a přiváděno do násobičky a do řídicího bloku.

## Sledovací napětí $U_I$

Odpovídá desetině velikosti vstupního proudu. Získává se z přesného proudového čidla švýcarské společnosti LEM, s typovým označením LA 55-P [26]. Toto čidlo funguje na principu Hallova jevu. Vodič, kterým protéká proud, který chceme měřit, prochází otvorem v těle součástky a je tedy bezpečně galvanicky oddělen. Z výstupní svorky sondy, označené „M“, pak teče proud, který je v poměru 1:1000 k měřenému proudu. Tento proud teče přes odpor  $R_4$  a trimr  $R_6$  do země, a vytváří na těchto odporech úbytek napětí rovný jedné desetině měřeného proudu. Trimrem  $R_6$  lze toto napětí přesně nastavit.

Napětí  $U_I$  se přivádí do násobičky, do řídicího bloku a je měřeno panelovým voltmetrem, který přímo zobrazuje hodnotu zatěžovaného proudu. Dále je možné toto sledovací napětí měřit na svorkách umístěných na čelním panelu zátěže. Jedná se o tzv. Current Monitor.

Jelikož jsou výstupní svorky tohoto monitoru opatřeny podobnými konektory jako svorky pro připojení zatěžovaného zařízení (tzv. „banánky“) a je tedy možná záměna kabelů obsluhou a připojení výkonového zdroje do zdířek Current Monitoru, je tento vstup chráněn Zenerovou diodou a tavnou pojistkou o hodnotě 100mA. Pokud by tomu tak nebylo, hrozilo by při záměně svorek v lepším případě „odpálení“ rezistoru  $R_4$  či trimru  $R_6$ , v tom horším zničení násobičky nebo proudového čidla.

## Sledovací napětí $U_P$

Posledním sledovacím napětím je napětí  $U_P$  odpovídající setině ztrátového výkonu, jež se trátí na zátěži. Toto napětí je získáváno z násobičky AD633[28] na jejíž vstupy jsou připojena napětí  $U_U$  a  $U_I$ . Obvod provádí násobení podle následujícího vztahu:

$$W = \frac{(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2)}{10V} + Z \quad (5.19)$$

Kde znaky  $X_1$ ,  $X_2$  a  $Y_1$  a  $Y_2$  reprezentují vstupní napětí.  $Z$  pak stejnosměrnou složku.  $X_2$ ,  $Y_2$  a  $Z$  jsou připojena k zemi, tedy nulová. Na vstupy  $X_1$  a  $Y_1$  jsou připojena napětí  $U_U$  a  $U_I$ . Nejvyšší výstupní napětí bude tedy:

$$W = \frac{(10 - 0)(4 - 0)}{10V} + 0 = 4V \quad (5.20)$$

Toto napětí odpovídá výkonu  $P = 200V \cdot 40A = 8000W$ . Je zřejmé, že tak velký rozsah měření výkonu není potřeba a příliš malá rozlišovací schopnost, odpovídající převodu  $1mV = 2W$ , by zaváděla do měření velkou nepřesnost. Proto je za násobičkou zařazen neinvertující zesilovač zesilující 20x. Tento nám zvýší sledovací napětí  $U_P$  na hodnotu odpovídající převodu  $1mV = 0,1W$ , tedy při maximálním výkonu 400W bude sledovací napětí  $U_P = 4V$ . Napětí lze přesně doladit trimrem  $R_{10}$ , jež určuje velikost zesílení operačního zesilovače. Trimrem  $R_{11}$  pak lze potlačit stejnosměrnou složku, která se může objevit na výstupu zesilovače. Sledovací napětí je přivedeno na řídicí blok a panelový voltmetr, který zobrazí přímo hodnotu odebíraného výkonu ve wattech.

## Přesnost měření proudu

Chyba měření proudového čidla je v katalogovém listě [26] udávána  $\pm 0,65\%$ . Chybu lze částečně potlačit přesným nastavením odporového děliče R4, R6. Po jeho přesném nastavení se tedy chybu měření proudu z Current Monitoru podařilo snížit pod  $0,4\%$ . Nepřesnost měření proudu pomocí panelového měřicího přístroje je však vyšší a dosahuje hodnoty až  $0,76\%$  (viz. kapitola 6.1.2).

Dělič R4, R6 vnáší do řetězce také teplotně závislou chybu měření. V děliči jsou proto použity kvalitnější součástky. Metalizovaný rezistor R4, který má teplotní závislost  $T_K = 50 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ , a cermetový víceotáčkový trimr s teplotní závislostí  $T_K = 100 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ . Při změně teploty o  $10^\circ\text{C}$  se hodnota odporu, a tedy i napětí na děliči, změní o 0,15%. Chyba tedy není příliš velká. Teplotní závislost výstupního proudu proudového čidla není v katalogovém listu udána.

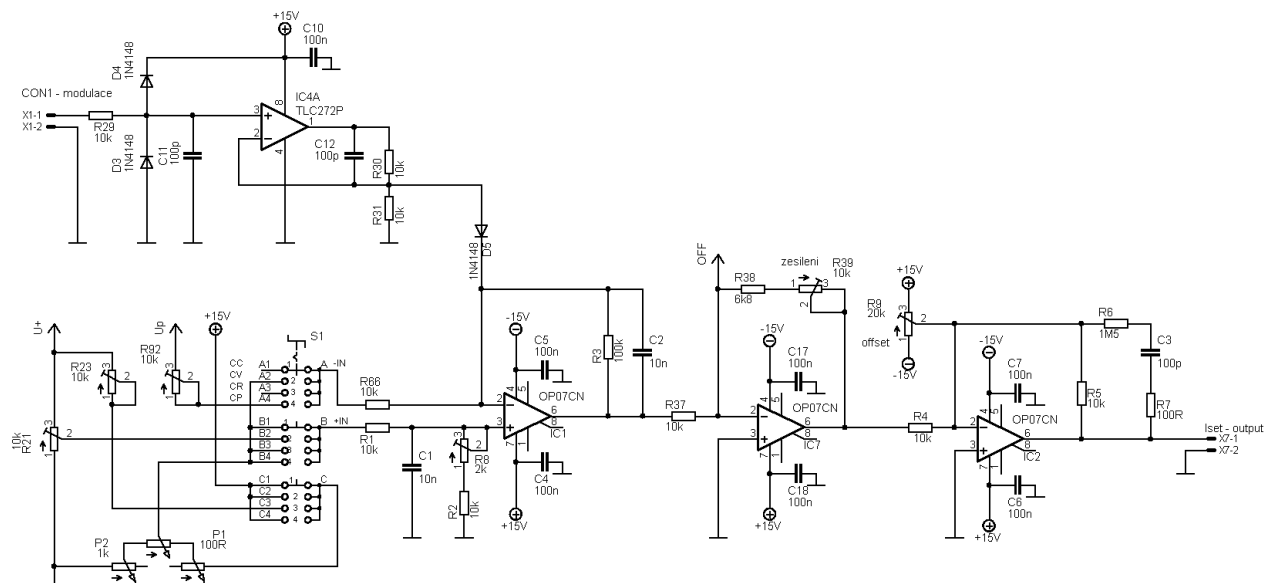
## Přesnost měření výkonu

Při měření výkonu se počítají chyby měření proudodvého čidla a chyba převodu násobičky, která může činit až  $\pm 2\%$ . Měření výkonu tedy není příliš přesné. Dosahuje chyby větší než 3%, jak bylo změřeno v kapitole 6.1.2.

### 5.5 Řídící blok

Řídicí blok je srdcem celé elektronické zátěže. Provádí se v něm volba režimu činnosti zátěže a nastavení hodnoty zatěžovaného proudu. Také do něj vstupuje signál blokování sloužící k odpojení zátěže, a signál pro dynamický provoz. Schéma zapojení je uvedeno na obr.5.10.

Čtyřpolohový přepínač S1 slouží k volbě režimu činnosti CC, CV, CI nebo CP. V podstatě kombinovaně připojuje různá referenční regulovaná napětí na invertující a neinvertující vstupy operačního zesilovače IC1. Jeho činnost lze pochopit při sledování zjednodušených schémat uvedených v kapitole 3.2. Hlavní referenční napětí je nastavitelné od nuly do 15V. Hrubě pomocí potenciometru P2 jemně pak potenciometrem P1. Referenční napětí  $U_p$  a  $U_+$  jsou doladěny pomocí trimrů tak aby v každém režimu odpovídalo maximální natočení potencimetru nejvyšší hodnotě ve zvoleném rozsahu.

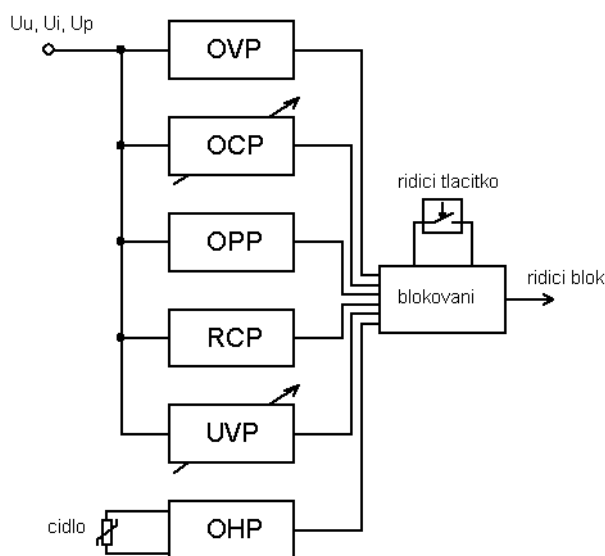


Obr. 5.10 Schéma zapojení řídicího bloku

Tato referenční napětí vstupují do kvalitního nízkošumového operačního zesilovače IC1 OP07. Na invertující vstup tohoto zesilovače je také přes IC4A přiváděn signál z externího generátoru. Tento vstup tedy umožňuje dynamický režim činnosti. Výstupní kladné napětí zesilovače IC1 je přibližně v rozmezí od 0 do 8V. Přivádí se na vstup invertujícího zesilovače IC7 kde je jej možné přesněji zesílit tak aby největší proud zátěží odpovídal natočení potenciometrů P1 a P2 do maximální polohy. Na vstup IC7 je také přiveden signál blokování z bloku ochran – označen OFF. Hodnota tohoto signálu dosahuje při blokování velikosti záporného saturačního napětí. Jeho přivedením se výstup celého řetězce, označený  $I_{SET}$ , překlápí do záporné saturace a tím dojde ke spolehlivému zavření všech tranzistorů ve výkonovém bloku. Invertující jednotkový zesilovač IC2 slouží pro eliminaci stejnosměrné složky, která se může v řetězci operačních zesilovačů vyskytnout. Trimrem R9 lze tedy nastavit nulovou hodnotu odebíraného proudu při nulovém natočení potenciometrů.

### 5.5.1 Blok ochran

Blok ochran je sestaven z několika komparátorů, jež zpracovávají sledovací napětí  $U_U$ ,  $U_I$  a  $U_P$  ze vstupního bloku. Tyto komparátory zajistí ochrany OVP, OCP a OPP. Dále je v bloku dvojice komparátorů zajišťující ochranu proti přehřátí, OTP, a komparátor který odpojí zátěž při poklesu napětí pod stavenou mez. Jedná se tedy o ochranu zvanou UVP. Poslední je ochrana proti přepólování zvaná RCP. Zátěž tedy zajišťuje všechny typy ochran, stejně jako komerčně vyráběné přístroje. Blokové schéma je naznačeno na obr.5.11.



Obr. 5.11 Blokové schéma bloku ochran

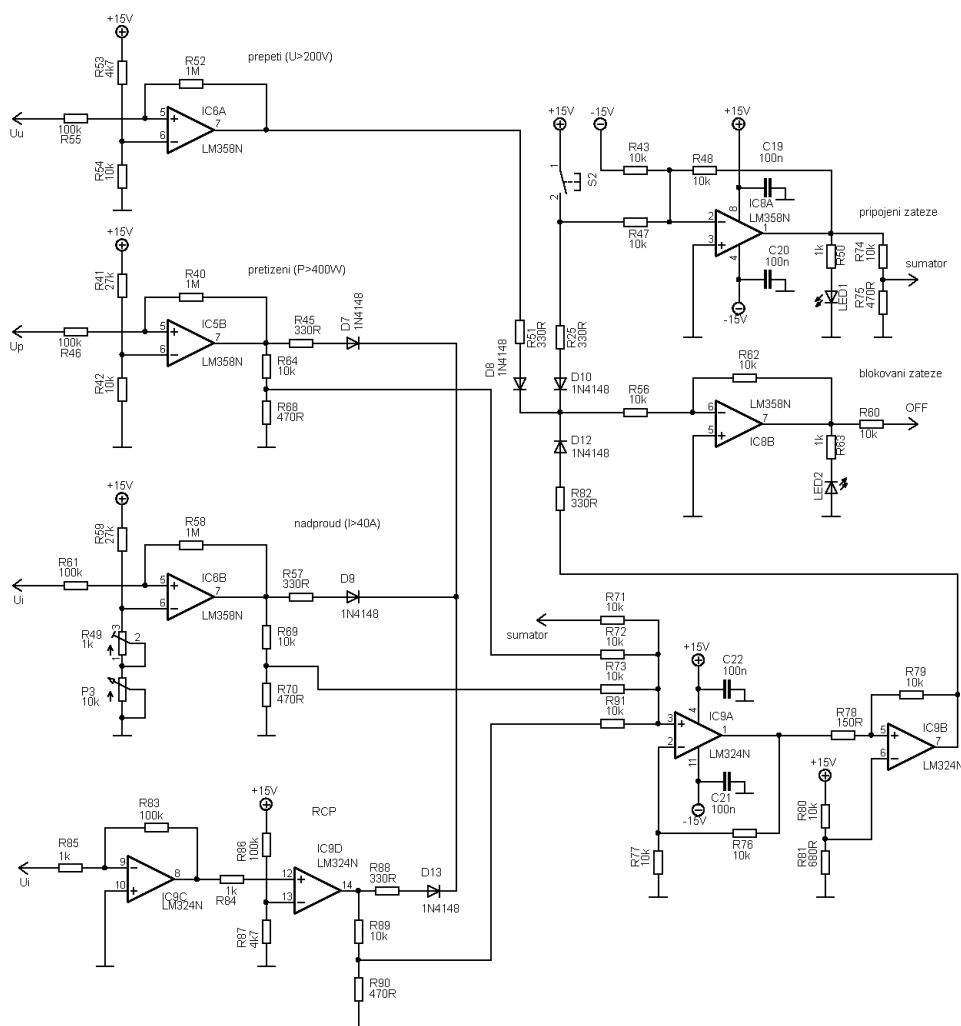
### Přepětová ochrana – OVP

Schéma zapojení je uvedeno na obr.5.12. Ochrana je tvořena komparátorem IC6A na jehož vstup je přiváděno sledovací napětí  $U_U$ . Pokud dojde k nárůstu tohoto sledovacího napětí nad 4V (což odpovídá napětí 200V připojených na vstupní svorky zátěže), nastane překlápění komparátoru a na jeho výstupu se objeví kladné saturační napětí cca.13,5V pomocí něhož dojde k zablokování zátěže. Operační zesilovač má zavedenu kladnou zpětnou vazbu – jedná se tedy o komparátor s hysterezí. K jeho zpětnému překlápění dojde až při poklesu napětí na hodnotu asi 170V.

## Nadproudová ochrana – OCP

Tato ochrana je podobně jako OVP tvořena komparátorem s hysterezí IC6B, který se překlápí při určitém napětí. Toto napětí je nastavitelné potenciometrem P3 na čelním panelu. Ochranu lze tedy nastavit v rozsahu přibližně 1 až 40A a tím chránit testované zařízení.

Oproti OVP nevystačíme v tomto případě jen s jednoduchým komparátorem s hysterezí, jelikož je celá soustava v uzavřené zpětnovazební smyčce. Pokud by došlo k nárůstu sledovacího napětí  $U_I$  nad stanovenou mez, zátěž by odpojila testované zařízení, přestal by jí protékat zatěžovaný proud a tím by došlo k poklesu  $U_I$  na nulu a k opětovnému připojení testovaného zařízení. Tím by se celá soustava rozkmitala. Tento problém je vyřešen přidáním součtového zesilovače IC9A a dalšího komparátoru s hysterezí IC9B, tak jak je zakresleno na obr.5.12.

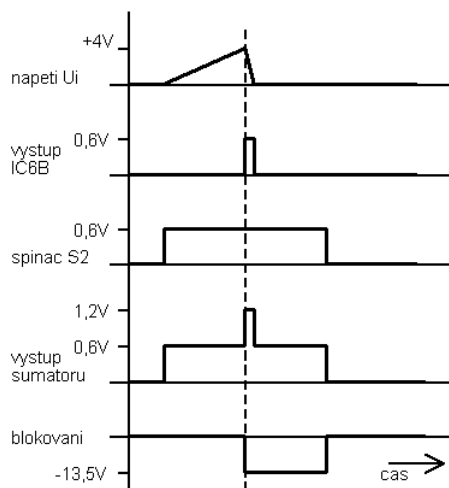


Obr. 5.12 Schéma zapojení bloku ochrany s ochranami OVP, OCP, OPP a RCP

Princip činnosti lze nejlépe pochopit sledováním průběhů napětí, zakreslených na obr.5.13. V pracovním režimu, tedy při rozpojení tlačítkového spínače S2 je přes dělič na sumátor přivedeno napětí z IC8A o hodnotě asi 0,6V. Obsluha natavuje zvyšující se proud zátěží. Napětí  $U_I$  vzrůstá až do spuštění ochrany OCP, tedy překlacení komparátoru IC6B. Také na jeho výstupu se přes dělič objeví napětí 0,6V. Toto napětí se sečtou, čímž bude na vstupu komparátoru IC9B napětí 1,2V, dojde k jeho překlacení a tím k zablokování zátěže, přerušení toku zatěžovaného proudu a poklesu

sledovacího napětí  $U_I$  na nulu. Komparátor IC6B se překlápí zpět a výstupní napětí sumátoru, tedy vstupní napětí komparátoru IC9B poklesne na 0,6V. Komparátor se však díky hysterezi nepřeklápí zpět. Napětí na jeho vstupu musí poklesnout více. To nastane až po stisku tlačítka S2 kdy výstupní napětí sumátoru poklesne na nulu a komparátor se překlápí. Po dalším stisku tlačítka je zátěž opět v pracovním, neblokováném stavu.

Jednotlivé komparátory jsou odděleny diodami aby nedocházelo k jejich vzájemnému ovlivňování.



Obr. 5.13 Průběhy napětí na komparátorech nadproudové ochrany

Na schématu na obr.5.12 je také zakresleno použití invertujících zesilovačů IC8A a IC8B, které zpracovávají napětí z tlačítkového spínače S2 a výstupní napětí všech komparátorů (pro zjednodušení nejsou ve schématu zakresleny komparátory ochrany OTP a UVP – kompletní schéma je uvedeno v příloze). Pokud je tlačítko rozpojeno, je zátěž v pracovním režimu a na čelním panelu svítí zelená LED1. Při stisku dojde k zablokování zátěže a svítí červená LED2.

## Ochrana proti přetížení – OPP

Ochrana zajišťuje komparátor IC5B. Pracuje totožně jako nadproudová ochrana. I rozsah vstupního napětí je stejný – k překlopení tedy dojde pokud hodnota  $U_p$  překročí hranici 4V odpovídající ztrátovému výkonu 400W. Také výstup komparátoru této ochrany je připojen na sumátor jelikož se ochrana nachází ve zpětnovazební smyčce stejně jako OCP.

## Ochrana proti přepólování – RCP

Ochrana tvoří invertující operační zesilovač IC9C ze stonásobným zesílením a komparátor IC9D. Pokud proud teče obráceným směrem, je sledovací napětí  $U_I$  záporné. Již při nízké hodnotě tohoto záporného napětí dojde k překlopení komparátoru a k zablokování zátěže. Blokování je však spíše pouze informativní, jelikož se proud tekoucí obráceným směrem bude uzavírat přes ochranné diody, které jsou implementovány přímo v MOSFET tranzistorech. Proud tedy bude tranzistory protékat i po zablokování zátěže. K skutečnému zablokování by muselo dojít pomocí fyzického přerušení

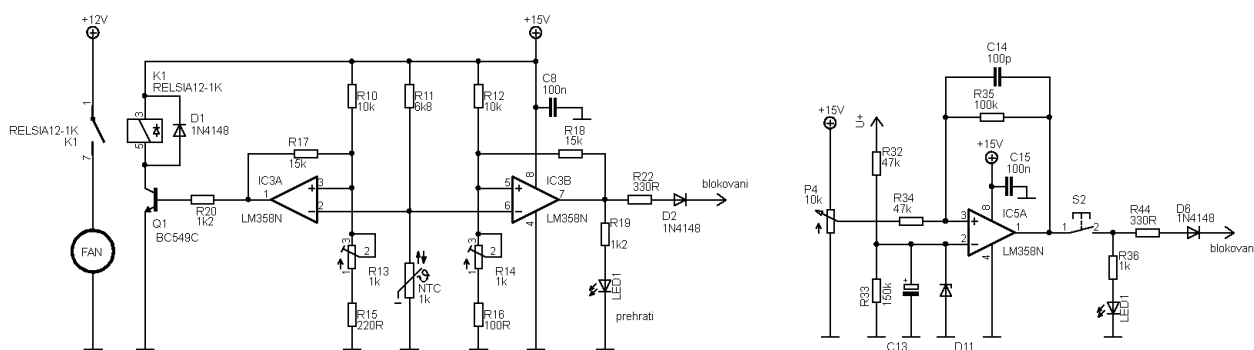
toku proudu, nejlépe pomocí výkonového stykače.

Signál blokování je opět také přiveden na vstup sumátoru, tak aby blokování bylo dlouhodobé a obsluha mohla rozpoznat, že jsou vstupní svorky připojeny obráceně. Schéma zapojení je uvedeno na obr.5.12.

## Ochrana proti přehřátí – OTP

Schéma zapojení je zakresleno na obr.5.13a. Skládá se ze dvou komparátorů IC3A a IC3B. K invertujícím vstupům obou komparátorů je přiváděno napětí z děliče tvořeného rezistorem R11 a termistorem. Tento termistor má negativní teplotní koeficient – s růstem teploty bude tedy napětí na děliči klesat. Při dosažení hodnoty nastavené trimrem R13 dojde k překlopení komparátoru IC3A a přes tranzistor Q1 dojde k sepnutí relé, které zapne ventilátor. Toto nastane při teplotě chladiče přibližně 50°C. Hystereze překlopí komparátor zpět a vypne relé při teplotě cca.40°C.

Podobně funguje druhý komparátor, s tím rozdílem, že se překlopí při teplotě 90°C. Zajišťuje tedy, aby nedošlo k překročení nejvyšší dovolené teploty pouzder tranzistorů připojených k chladiči. Výstup tohoto komparátoru je připojen k blokování celé zátěže a při překročení nejvyšší teploty dojde k odpojení testovaného zařízení. Přehřátí je také signalizováno červenou LED diodou na čelním panelu.



Obr.5.13 Schéma zapojení ochrany proti přehřátí a ochrany proti nejnižšímu napětí

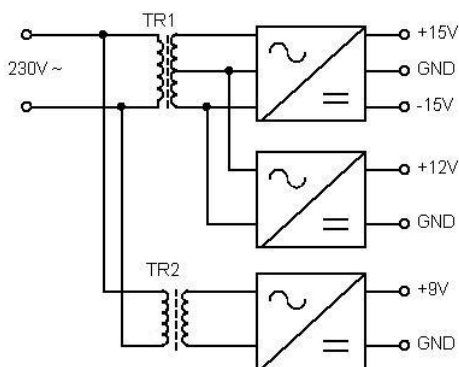
- a) Ochrana OTP
- b) Ochrana UVP

## Ochrana proti nejnižšímu napětí – UVP

Tato ochrana je užitečná zejména při měření vybíjecích charakteristik akumulátorů. Jedná se o pojistku která neslouží k ochraně elektronické zátěže, nýbrž testovaného zařízení – tedy akumulátoru. Pokud u něj při procesu vybíjení poklesne napětí pod minimální mez, může dojít k jeho nevratnému poškození. Schéma zapojení je uvedeno na obr.5.13b. Ochrana je tvořena jedním komparátorem s hysterezí IC5A. Velikost napětí při kterém dojde k překlopení komparátoru je nastavitelná potenciometrem P4 umístěným na čelním panelu. Vypínací napětí je nastavitelné od 0 do 12V. Je použit logaritmický potenciometr, tak aby v nižších hodnotách napětí bylo nastavení jemnější. Komparátor je přes dělič R32, R33 připojen ke vstupním svorkám zátěže – vodič U+. Vstup je chráněn Zenerovou diodou, jelikož se na něm může objevit vyšší napětí, než je nejvyšší dovolené napětí operačního zesilovače. Zapojení také obsahuje filtrační kondenzátory C13 a C14 vyrovnávající napěťové špičky při připojování akumulátoru. Výstup je vypínatelný přepínačem, tak aby tato ochrana byla v provozu jen při testování akumulátorů. Při poklesu napětí pod stanovenou mez tedy dojde k odpojení testovaného zařízení. Toto je také signalizováno LED diodou na čelním panelu.

## 5.6 Napájecí zdroj

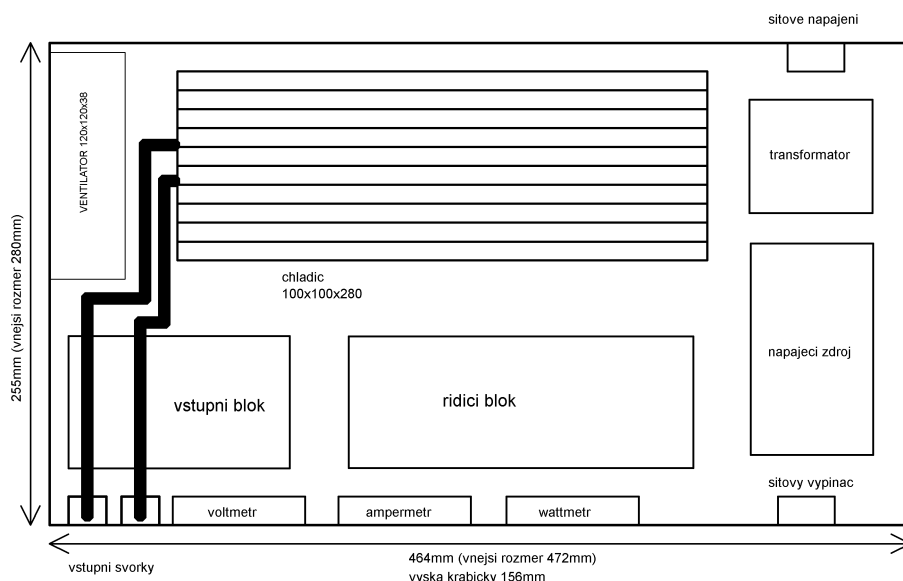
Jelikož panelové voltmetry (tedy ampérmetr, voltmetr a wattmetr) vyžadují samostatné napájení s oddělenou zemí, obsahuje napájecí zdroj dva síťové transformátory. Za hlavním transformátorem TR1 o výkonu 40VA jsou zařazeny usměrňovače a stabilizátory dodávající symetrické napájecí napětí +15V a -15V pro napájení všech elektronických obvodů, a stabilizátor dodávající napájení +12V pro ventilátor. Miniaturní transformátor TR2 o výkonu 0,5VA pak přes stabilizátor napájí napětím +9V panelové voltmetry, které mají minimální odběr. Blokové schéma napájecího zdroje je uvedeno na obr.5.14. Celé schéma je uvedeno v příloze.



Obr. 5.14 Blokové schéma napájecího zdroje

## 5.7 Mechanická konstrukce

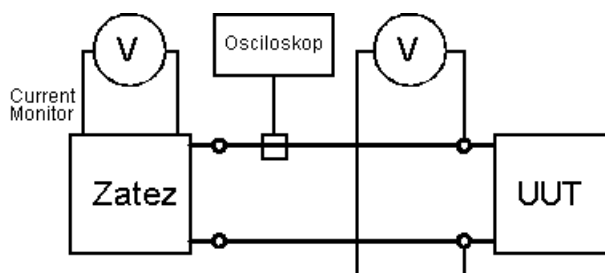
Celá konstrukce je zabudována do komerčně prodávané přístrojové krabice o rozměrech 280 x 472mm a výšce 156mm. Způsob rozložení desek plošných spojů jednotlivých bloků a ostatních dílů je naznačen na obr.5.15. Ze vstupních svorek pro připojení zatěžovaného zařízení, se proud vede silnými vodiči přes vstupní blok do výkonového bloku, který je „schován“ pod chladičem (viz. obr.5.6). Aktivní chlazení zajišťuje ventilátor umístěný v levé části. Otvor pro vstup chladicího vzduchu je umístěn naproti ventilátoru v pravé části – v místě kde je transformátor. Zde je také umístěna deska napájecího zdroje. Řídicí blok, k němuž vede nejvíce kabeláže, je umístěn uprostřed.



Obr. 5.15 Způsob rozložení jednotlivých částí v přístrojové krabici

## 6. Měření

Jelikož panelové voltmetry elektronické zátěže nejsou příliš přesné, bylo měření prováděno na precizních stolních multimetrech. Měření proudu, respektive hodnoty napětí úměrného hodnotě proudu, bylo prováděno z výstupu Current Monitoru jehož citlivost je 100mV/A. Měření napětí pak bylo prováděno přímo u zdroje, tak aby se minimalizovaly úbytky napětí na přívodních vodičích. Střídavé průběhy pak byly snímány pomocí proudové sondy osciloskopu. Schéma zapojení je uvedeno na obr.6.1.

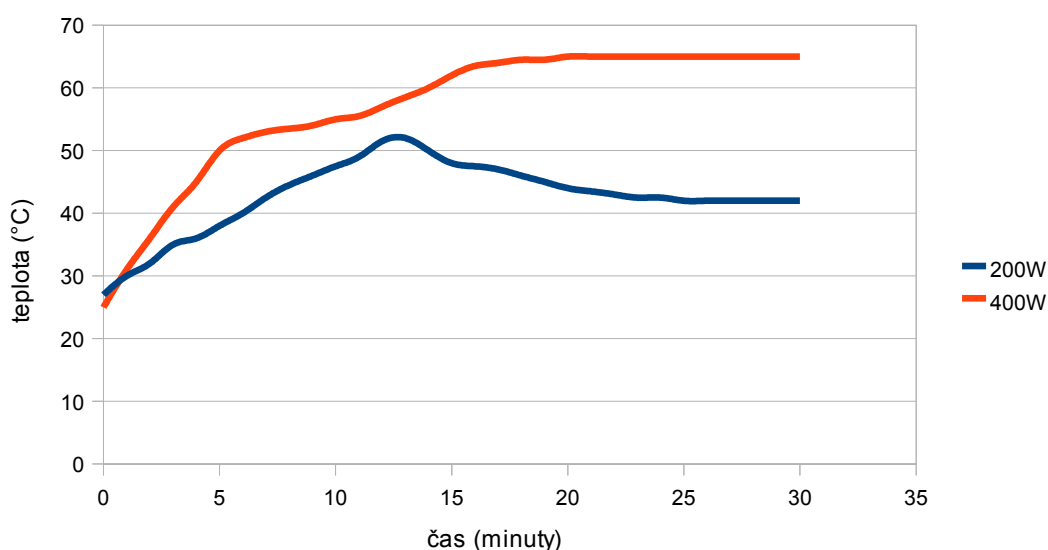


Obr. 6.1 Schéma zapojení pro měření

### 6.1 Měření parametrů zátěže

#### 6.1.1 Měření účinnosti chlazení

Účinnost chlazení byla ověřena měřením. Výsledky jsou uvedeny v grafu na obr.6.2. Měření byla provedena pro dvě hodnoty ztrátového výkonu, 200W a 400W. Měření teploty chladiče byla vždy započata od pokojové teploty až po dobu kdy dojde k ustálení teploty chladiče. Při zátěži 200W roste teplota k hodnotě 50°C kdy dojde k zapnutí ventilátoru. Toto trvá přibližně 13 minut. Poté se teplota začne snižovat, až se po přibližně třiceti minutách od počátku zatěžování ustálí na hodnotě 42°C.



Obr. 6.2 Průběh teploty chladiče pro dvě různé hodnoty výkonu



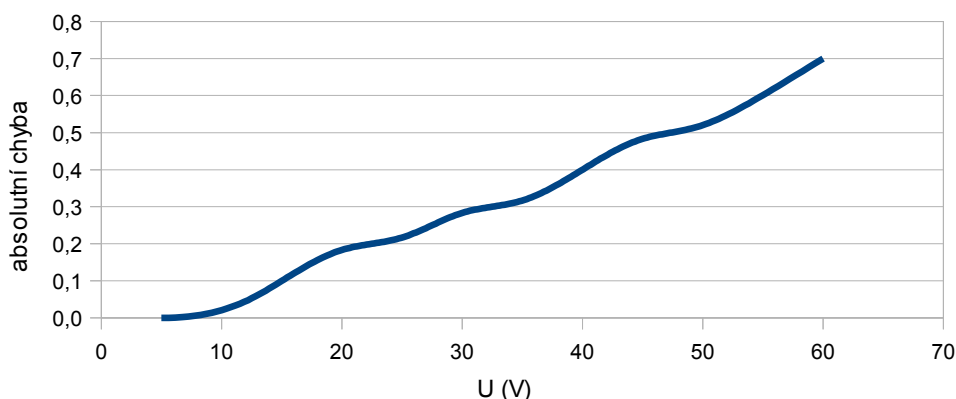
Při výkonu 400W roste teplota strměji a ventilátor se zapne již po pěti minutách. Strmost nárůstu teploty se tím sníží, avšak nezastaví tak jak tomu bylo u výkonu 200W. Roste až k hodnotě 65°C kde se přibližně po dvaceti pěti minutách ustálí.

Ventilátor se znovu vypne pokud teplota poklesne na přibližně 40°C.

Měřením bylo tedy dokázáno, že výpočet chlazení provedený v kapitole 5.2.1 je správný. Zařízení se při nejvyšším dovoleném výkonu spolehlivě uchladí. K sepnutí teplotní pojistky nastavené na cca.90°C by tedy v běžném provozu nemělo dojít. Přesto je pojistka užitečná aby nedošlo k přehřátí přístroje například při poruše ventilátoru nebo při zakrytí ventilačních otvorů.

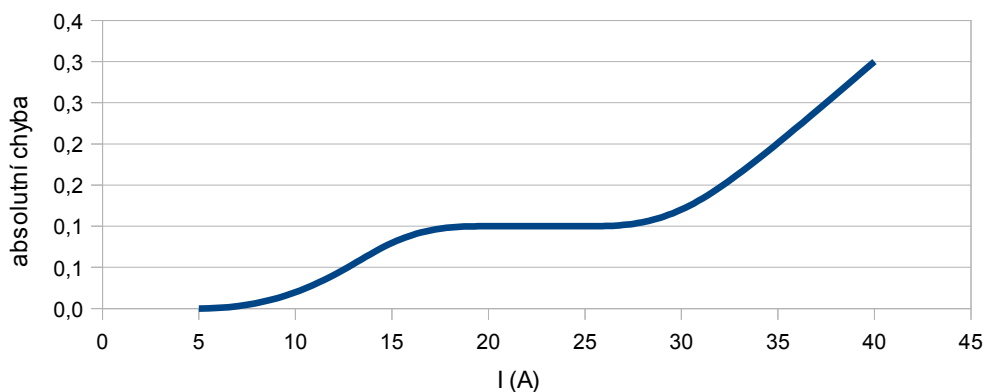
### 6.1.2 Měření přesnosti panelových měřicích přístrojů

Měření bylo pro ampérmetr a wattmetr provedeno v celém měřicím rozsahu. Tedy 40A, respektive 400W. U voltmetru bylo měření provedeno jen do hodnoty 60V. Výsledky měření přesnosti voltmetru jsou uvedeny v grafu na obr.6.3. Absolutní odchylka se s vzrůstajícím napětím zvyšuje. U napětí 60V dosahuje relativní chyba velikosti 1,15%. Je tedy větší než výrobcem deklarovaná nepřesnost 0,5%. Přitom tento voltmetr je připojen přímo ke vstupním svorkám zátěže.



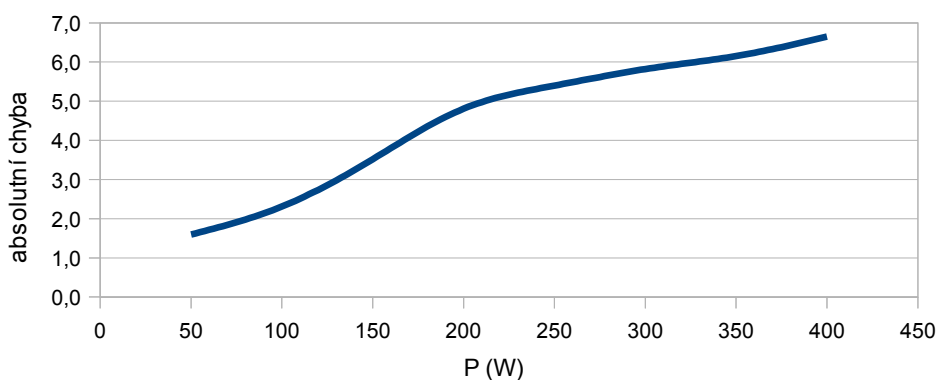
Obr. 6.3 Chyba měření panelového voltmetru

Výsledky měření přesnosti ampérmetru jsou uvedeny v grafu na obr.6.4. Ampérmetr vykazuje menší chybu měření než voltmetr, nejvíce činí 0,76% při proudu 40A. Je to dáno tím, že bylo možné chybu měření eliminovat nastavením děliče napětí u proudového čidla ve vstupním bloku, jak bylo popsáno v kapitole 5.4.



Obr. 6.4 Chyba měření panelového ampérmetru

Jako poslední bylo provedeno měření přesnosti wattmetru, uvedené na obr.6.5. Z testovaných panelových měřidel dopadl nejhůře, což je dáno součtem chyb při výpočtu výkonu, tak jak bylo posáno v kapitole 5.4. Chyba měření je nejvyšší při výkonu 50W a činí 3,19%. Se vzrůstajícím výkonem stoupá absolutní chyba, avšak snižuje se chyba relativní. Při výkonu 400W činí 1,66%.

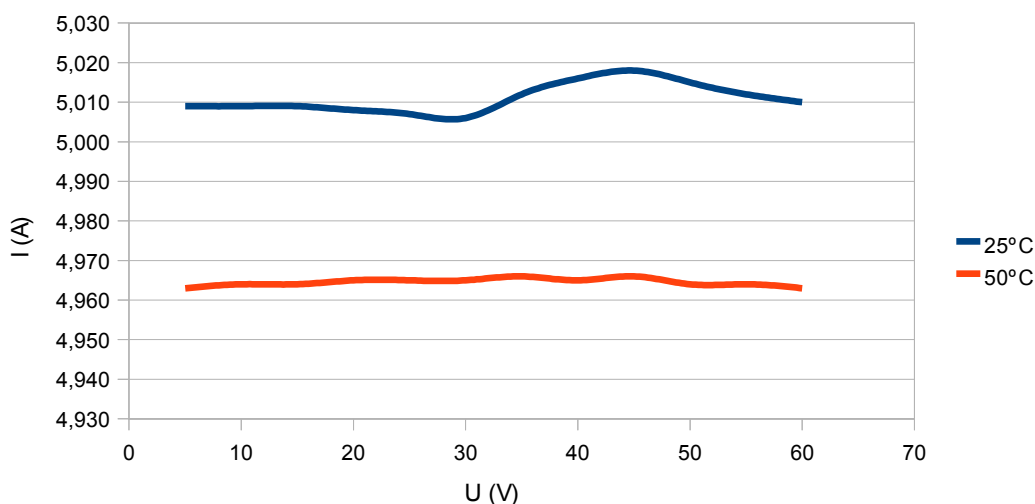


Obr. 6.5 Chyba měření panelového wattmetru

Z naměřených hodnot lze tedy vyvodit závěr, že panelové měřicí přístroje je možno použít pouze pro informativní měření.

### 6.1.3 Měření režimu konstantního proudu

V režimu konstantního proudu je základním předpokladem schopnost zátěže udržet velikost odebíraného proudu na stále stejné hodnotě, bez ohledu na velikost napětí zatěžovaného zařízení. Měření bylo provedeno při konstantním proudu 5A a změnách napětí v rozmezí 5V až 60V. Toto měření bylo také provedeno při dvou různých teplotách chladiče – tedy pouzder tranzistorů. Při pokojové teplotě 25°C a po zahřátí při teplotě asi 50°C. Výsledky jsou uvedeny na obr.6.6.

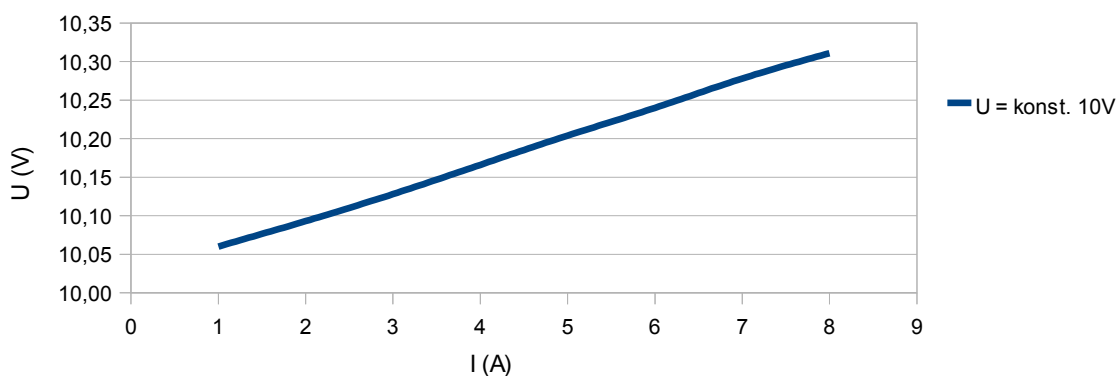


Obr. 6.6 Měření režimu konstantního proudu

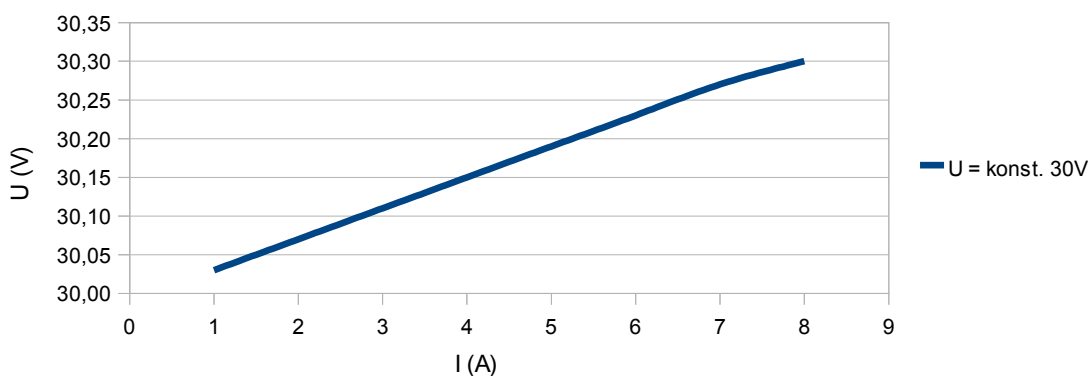
Z grafu je vidět, že kolísání proudu při změnách napětí je velmi nízké. Pohybuje se v mezích  $\pm 10\text{mA}$ . Největší naměřený rozdíl je  $12\text{mA}$  což činí relativní odchylku  $0,24\%$ . Tato změna proudu je téměř zanedbatelná. Větší vliv na změnu konstantního proudu bude mít změna teploty. S nárůstem na  $50^\circ\text{C}$  poklesne proud přibližně o  $50\text{mA}$ , což je  $1\%$ . I tato chyba je však stále poměrně malá. Zajímavé také je, že při vyšší teplotě dochází k menším výkyvům nastaveného proudu než při teplotě  $25^\circ\text{C}$ . Výkyvy jsou naprosto minimální a pohybují se řádově v jednotkách miliampér.

#### 6.1.4 Měření režimu konstantního napětí

V tomto režimu byla měření provedena pro dvě různé hodnoty nastaveného napětí. Pro  $10\text{V}$  (obr.6.7) a  $30\text{V}$  (obr.6.8). Proud byl regulován od  $1\text{A}$  do  $8\text{A}$ . U obou měření se s rostoucím proudem hodnota konstantního napětí zvyšuje přibližně stejně. Dojde k nárůstu o cca.  $250\text{mV}$ . Tato chyba je dána zejména poklesem svorkového napětí zatěžovaného zdroje, na niž zátěž zareaguje zvýšením hodnoty konstantního napětí. Pro přesnější měření by bylo potřeba použít tvrdší napájecí zdroj.



Obr. 6.7 Měření režimu konstantního napětí při hodnotě  $10\text{V}$

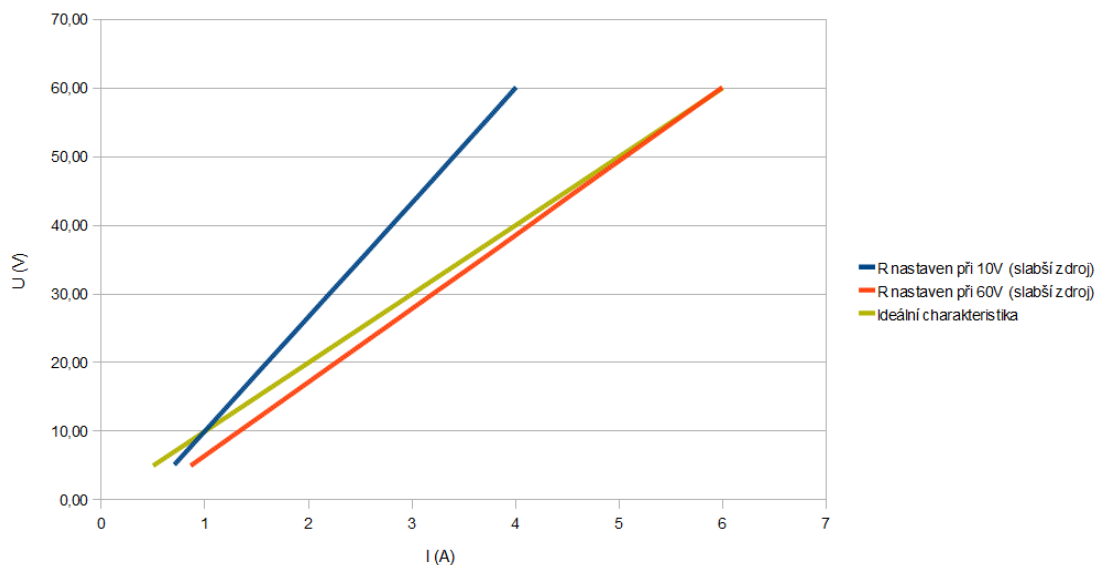


Obr. 6.8 Měření režimu konstantního napětí při hodnotě  $30\text{V}$

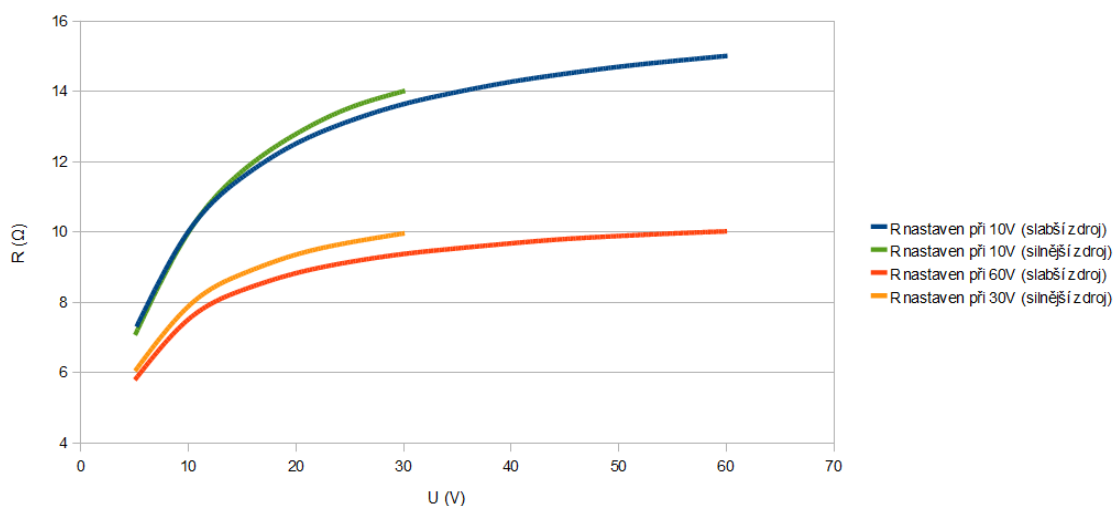
#### 6.1.5 Měření režimu konstantního odporu

V tomto režimu byla nastavena a vypočtena hodnota konstantního odporu  $10\Omega$  při dvou různých napětích,  $10\text{V}$  a  $60\text{V}$  (respektive  $30\text{V}$ ) pro dva různé napájecí zdroje, tak aby bylo možné posoudit vliv tvrdosti zdroje na nastavenou hodnotu odporu při změnách svorkového napětí. Velikost napětí při němž byl odpor nastaven má vliv na další změny hodnoty odporu. Na obr.6.9 je zakreslena volt-

ampérová charakteristika režimu CR. Je patrné, že průběh je lineární a s hodnotou při které byl odpor nastaven se mění „pouze“ poloha a sklon přímky.



Obr. 6.9 Volt-ampérová charakteristika režimu CR

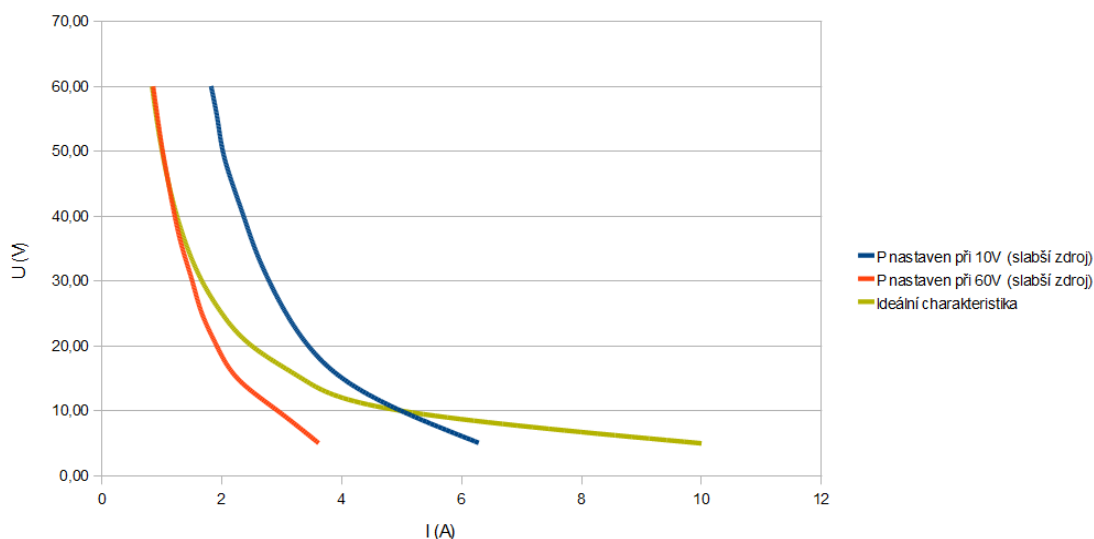


Obr. 6.10 Závislost CR na změnách napětí

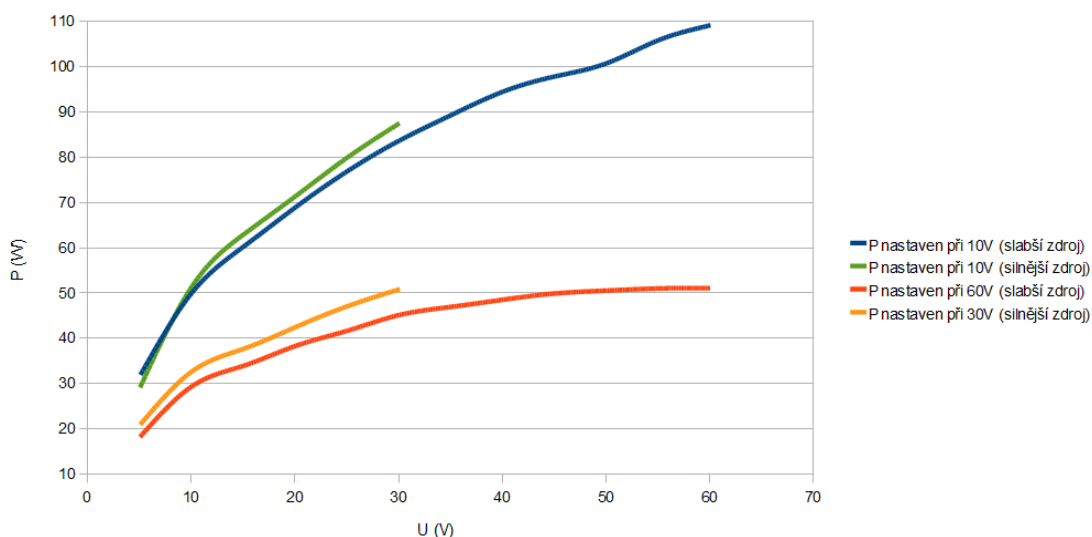
Na obr.6.10 je zakreslena závislost hodnoty odporu na měnícím se napětí. Z naměřených charakteristik je patrné, že hodnota nastaveného odporu se s rostoucím napětím značně zvyšuje. Pokud je hodnota  $10\Omega$  nastavena při napětí 10V, dojde k jejímu vzrůstu až na  $15\Omega$  při napětí 60V. Pokud se konstantní odpor měří s dvakrát silnějším zdrojem, tak se změna napětí projeví ještě výrazněji. Úbytek napětí na zdroji tedy nemá na nastavenou hodnotu tak veliký vliv. Pro zvýšení přesnosti by patrně bylo potřeba zajistit dorovnávání odchylky napětí pomocí lepší zpětné vazby.

### 6.1.6 Měření režimu konstantního výkonu

Také v tomto režimu byl konstantní výkon 50W nastaven při dvou různých hodnotách napětí. Při 10V a 60V. Na obr.6.11 je volt-ampérová charakteristika tohoto režimu. Hodnota při které byla hodnota výkonu nastavena posouvá křivku ve směru proudu, její tvar se však téměř nemění. Při změnách napětí se hodnota konstantního výkonu značně mění. Pokud je nastavena při napětí 10V vzroste až na více než dvojnásobek při zvýšení napětí na 60V (obr.6.12). V elektronické zátěži by tedy opět bylo potřeba zajistit schopnost udržet konstantní výkon pomocí lepší zpětné vazby.



Obr. 6.11 Volt-ampérová charakteristika režimu CP



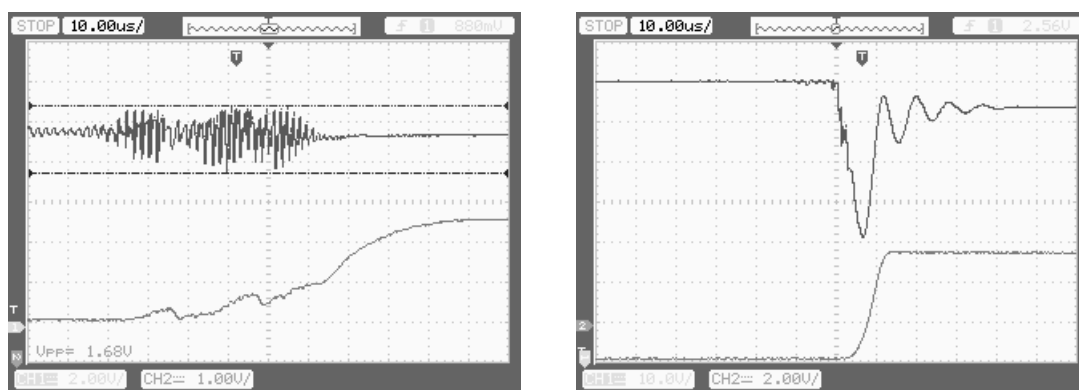
Obr. 6.12 Závislost CP na změnách napětí

Z naměřených charakteristik je patrné, že pro získání co nejkonstantnější hodnoty odporu a výkonu, je nejvhodnější tyto hodnoty nastavit při vyšším napětí.

## 6.1.7 Měření dynamických parametrů

### Chování při připojení a odpojení zátěže

Skokové připojování a odpojování zatěžovaného proudu k zátěži je přechodový děj, při kterém vznikají různé přechodové jevy a k ustálení odebíraného proudu a napětí zdroje dojde až po určité době. Měření byla prováděna z nabitého olověného akumulátoru, tak aby se předešlo případným zákrmitům, které by do měření vnášel napájecí zdroj. Na obr.6.13a jsou průběhy proudu a napětí při zapnutí zátěže, kdy je nastaven odebíraný proud 5A. Horní křivka znázorňuje průběh napětí, dolní pak průběh proudu.

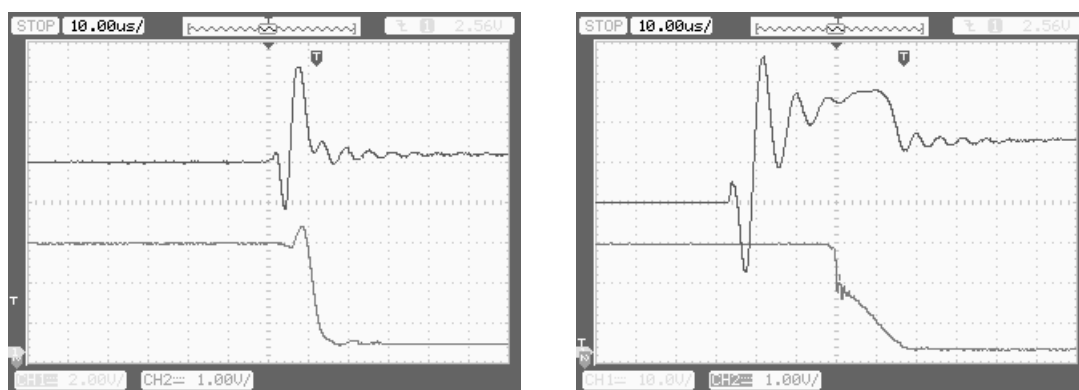


Obr. 6.13 Průběhy napětí a proudu při připojení zátěže

- a) velikost zatěžovaného proudu 5A
- b) velikost zatěžovaného proudu 30A

Napětí se po připojení zátěže rozkmitá. Při zátěži 5A je velikost přechodových jevů až 1,68V a ustálí se za dobu asi 55 $\mu$ s. Při zátěži 30A (obr.6.13b) se přechodový děj ustálí o málo rychleji, za přibližně 45 $\mu$ s. Velikost napětíového přechodu je však mnohem větší. Dojde k propadu velikosti napětí až o 7,8V. Nárůst velikosti proudu je při hodnotě 30A také mnohem strmější než u hodnoty 5A.

Na obr.6.14 jsou znázorněny průběhy napětí a proudů při odpojení zátěže. Průběhy byly opět změřeny pro dvě velikosti zatěžovaného proudu, 5A a 30A.



Obr. 6.14 Průběhy napětí a proudu při odpojení zátěže

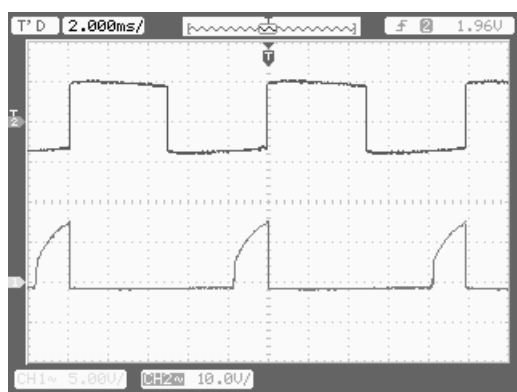
- a) velikost zatěžovaného proudu 5A
- b) velikost zatěžovaného proudu 30A

Při odpojení zátěže a poklesu odebíraného proudu z hodnoty 5A na nulu, dojde k rozkmitu napětí o cca. 3,2V. Rozkmitání napětí trvá přibližně 30 až 35 $\mu$ s. V případě odpojení proudu o velikosti 30A dojde k rozkmitu napětí o 5,3V, přičemž toto rozkmitání trvá přibližně 65 $\mu$ s. Rozkmitání napětí v tomto případě není příliš symetrické. Také proud nejprve klesne téměř strmě a poté dojde k jeho pozvolnějšímu lineárnímu poklesu. Bylo provedeno více měření a vždy došlo k naměření stejných výsledků.

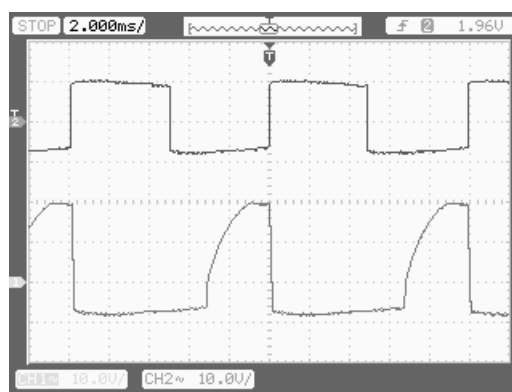
Ve všech případech dochází nejprve k rozkmitání napětí a až poté k poklesu proudu. To svědčí o tom, že zátěž vykazuje induktivní charakter.

## Chování při zatěžování obdélníkovým signálem

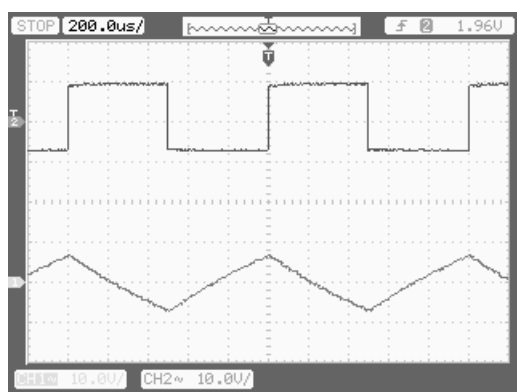
Zátěž dovoluje připojení externího zdroje signálu z generátoru. Tento signál musí mít obdélníkový tvar, přičemž v kladných půlvlnách dochází k zablokování zátěže, v záporných pak k připojení zatěžovaného zařízení (horní křivka). Na obr.6.15a je průběh odebíraného proudu při frekvenci 100Hz. Střední hodnota proudu má velikost 5A (dolní křivka). Na obr.6.15b je pak střední hodnota proudu 30A. Je patrné, že tvar průběhu odebíraného proudu a tím jeho střední hodnotu, lze nastavit v režimu konstantního proudu. To však nelze provést na všech frekvencích. Již při hodnotě 1kHz lze hodnotu odebíraného proudu nastavit jen při maximálním natočení potenciometru. Poté zátěž odebírá jen nízký proud spíše ve tvaru trojúhelníku (obr.6.15c). Při vyšších frekvencích již zátěž nedokáže odebírat proud. Šířka pásma tedy není příliš velká.



a)



b)



c)

Obr. 6.15 Průběh proudu zátěží při řídicím obdélníkovém signálu

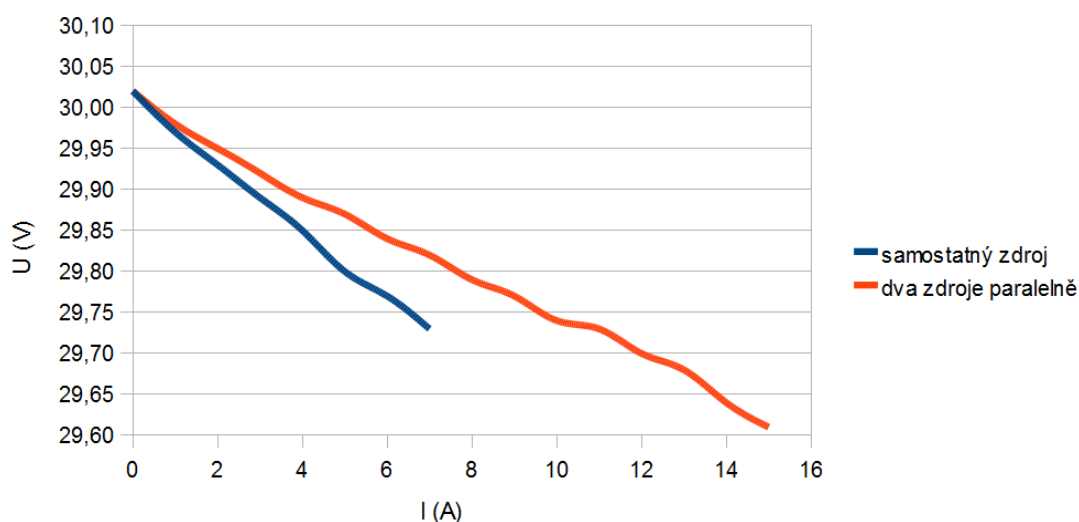
- a)  $f = 100\text{Hz}$ ,  $I = 5\text{A}$
- b)  $f = 100\text{Hz}$ ,  $I = 30\text{A}$
- c)  $f = 1\text{kHz}$

## 6.2 Měření vybraných zařízení

V teoretické části práce bylo poukázáno na širokou oblast využití elektronických zátěží, při měření různých elektrických zařízení. Proto je na ukázkou změřeno několik zařízení, které byly popsány v kapitole 4.

### 6.2.1 Měření napájecího zdroje

Pro měření byly vybrány dva regulovatelné napájecí zdroje HY 3005D-3. Tento zdroj má regulovatelné napětí 0-30V a dokáže dodat proud o velikosti až 7,8A. Změřena byla zatěžovací charakteristika jednoho napájecího zdroje (modrá křivka v grafu na obr.6.16) a dvou napájecích zdrojů spojených paralelně (červená křivka). Z grafu je jasné patrné že zatěžovací přímka paralelně spojených zdrojů klesá mírněji než u samostatného zdroje. Spojení tedy zvýší tvrdost zdroje, který je poté schopen dodat proud o hodnotě až 15,6A.



Obr. 6.16 Zatěžovací charakteristika napájecího zdroje

Podle vztahu 4.1 uvedeném v kapitole zabývající se testováním napájecích zdrojů, lze určit vnitřní odpor zdroje. Pro samostatný zdroj:

$$R_i = \frac{U - U_e}{I_z} = \frac{30,02 - 29,73}{7} = \underline{\underline{41,4m\Omega}} \quad (6.1)$$

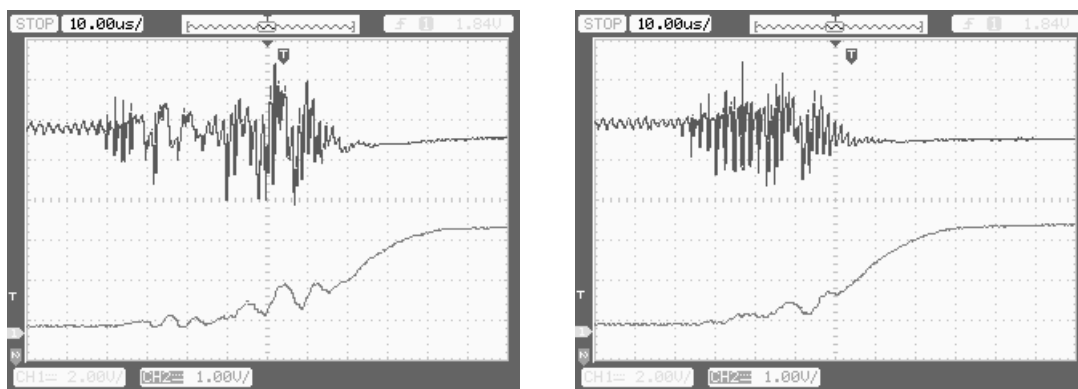
A pro dva totožné zdroje spojené paralelně:

$$R_i = \frac{U - U_e}{I_z} = \frac{30,02 - 29,82}{7} = \underline{\underline{28,6m\Omega}} \quad (6.2)$$

Paralelním spojením tedy vnitřní odpor nepoklesne přesně na polovinu jak by se dalo předpokládat, ale pouze na tři čtvrtiny. Je to způsobeno tím, že zdroje nejsou zcela totožné a dochází tedy také k předávání energie mezi nimi, ne pouze do zátěže.

Dále byla u zdroje měřena rychlost ustálení napětí při připojení zátěžovaného proudu o velikosti 5A. Podobně jako v případě měření výstupní charakteristiky bylo testování provedeno s jedním napájecím zdrojem HY 3005D-3 (obr.6.17a) a poté se dvěma těmito zdroji zapojenými paralelně (obr.6.17b). Je patrné, že tvrdost zdroje má vliv na velikost napěťových překmitů a dobu ustálení svorkového napětí. Tvrdší zdroj má rychlost ustálení a velikost překmitů menší.





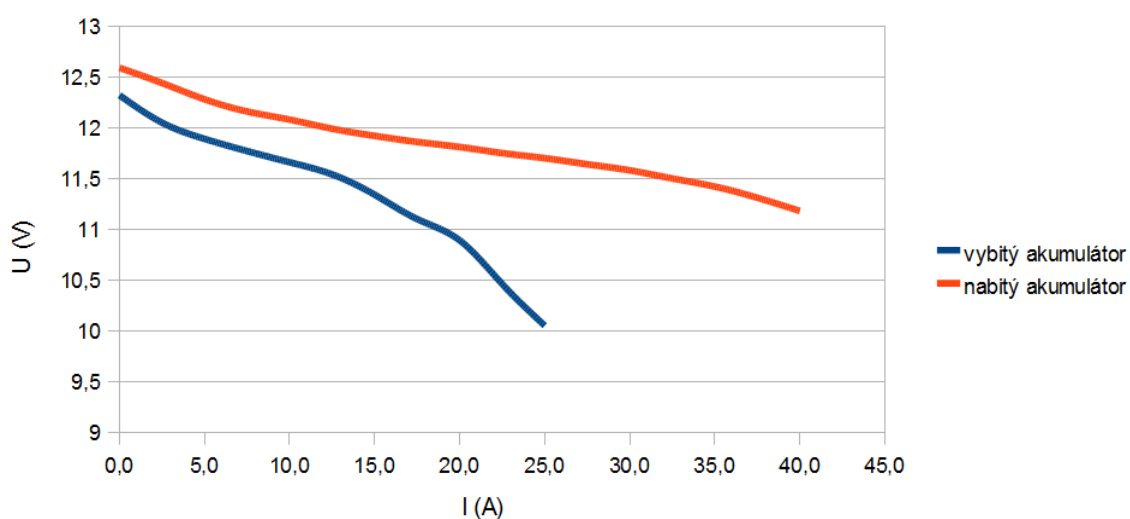
Obr. 6.17 Časová odezva ustálení napětí při skokovém zatížení napájecího zdroje

- a) samostatný napájecí zdroj
- b) dva zdroje spojené paralelně

## 6.2.2 Měření akumulátoru

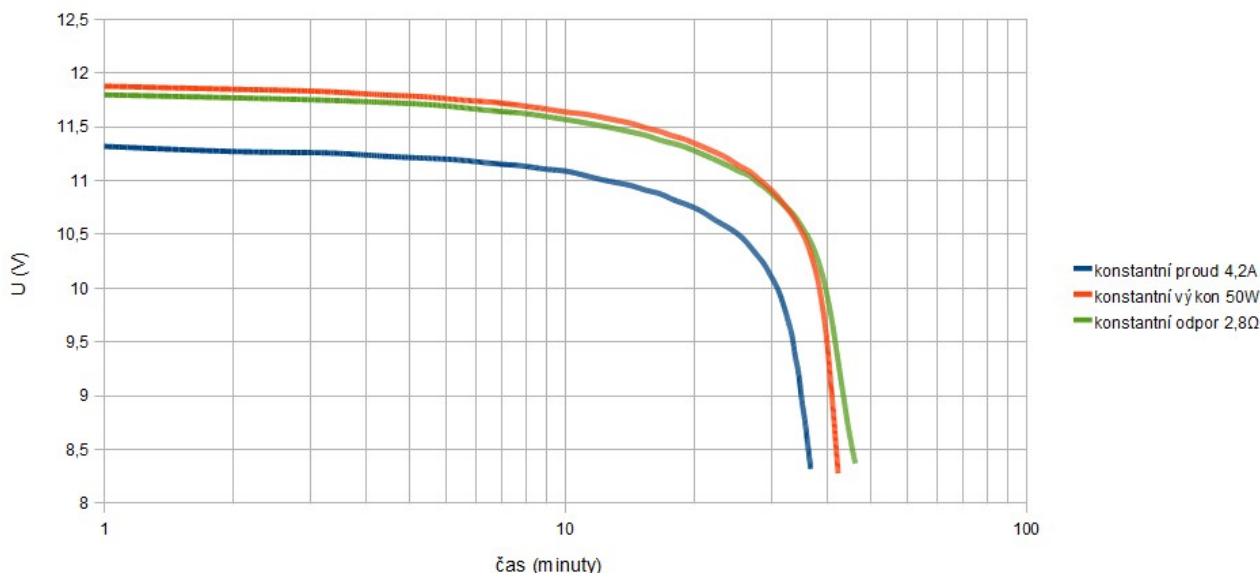
K měření byly využity dva akumulátory o dvou různých kapacitách. Malý olověný bezúdržbový akumulátor o kapacitě 7Ah pro měření vybíjecích charakteristik a velký automobilový akumulátor o kapacitě 43Ah. Oba mají jmenovité napětí 12V.

V grafu na obr.6.18 jsou zobrazeny zatěžovací charakteristiky pro automobilový akumulátor. Měření byla provedena pro 2 různé úrovně nabití akumulátoru. Pro téměř vybitý akumulátor a pro nabitý akumulátor. Z grafu je patrné že úroveň nabití má vliv na zatěžovací charakteristiku.



Obr. 6.18 Zatěžovací charakteristiky olověného akumulátoru o kapacitě 43Ah

Dále bylo provedeno měření vybíjecí charakteristiky menšího akumulátoru. Vybíjení bylo prováděno ve třech různých režimech zátěže – režimu konstantního proudu, výkonu a odporu. U všech tří režimů byly na počátku zatěžování nastaveny podobné zatěžovací podmínky, tedy velikost odebíraného proudu 4,2A. Tento proud při napětí 12V teče odporem o velikosti 2,8Ω a dodává výkon přibližně 50W. Charakteristiky jsou uvedeny na obr.6.19.

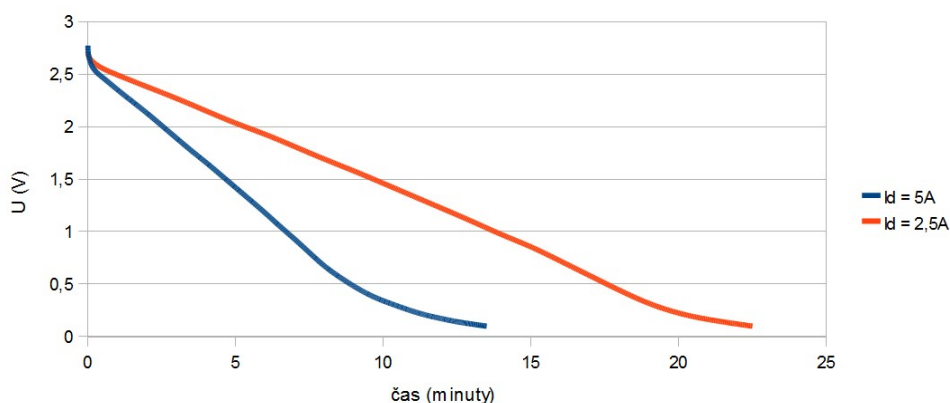


Obr. 6.19 Vybíjecí charakteristiky akumulátoru o kapacitě 7Ah

Rozdíly mezi vybíjecími charakteristikami nejsou příliš znatelné. Pro získání rozdílnějších hodnot by bylo potřeba vybit akumulátor při menší zátěži po delší dobu. Přesto je znatelný rozdíl mezi vybíjením při konstantním výkonu a konstantním odporu. Při CP se snižujícím napětím začíná odebírat vyšší proud – křivka tedy padá strměji. Při CR je tomu naopak – s klesajícím napětím proud také klesá. Křivka tedy bude padat pozvolněji.

### 6.2.3 Měření superkapacitoru

Měření bylo provedeno na superkapacitoru společnosti MAXWELL řady BCAP [20]. Kapacita superkapacitoru je 1200F, napětí 2,7V, vnitřní odpor 0,58mΩ. Kapacitor by měl být schopen dodat maximální kontinuální proud 81A a špičkový proud po dobu 1sec až 955A. Pro tento kondenzátor bylo provedeno měření vybíjecí charakteristiky při proudu 2,5A a 5A. Vyšší proudy bohužel nelze použít. Kvůli vstupnímu odporu zátěže nelze udržet konstantní vybíjecí proud vyšší hodnoty i při hodnotách nízkých napětí, což poté vnáší do charakteristiky značnou nelinearitu. Výsledky měření jsou uvedeny v grafu na obr.6.20.



Obr. 6.20 Vybíjecí charakteristiky superkapacitoru

Na začátku zatěžování poklesne napětí na kondenzátoru skokově z  $U_0 = 2,75V$  na 2,55V. Poté se napětí na kondenzátoru lineárně snižuje. Nelinearita nastává až od hodnoty nižší než 0,5V (při

vybíjení proudem 5A) kdy se začne projevovat vnitřní odpor zátěže. Po dosažení nejnižší doporučené hodnoty  $U_{\min} = 0,1V$  se zátěž odpojí a napětí na kapacitoru tím mírně vzroste na hodnotu  $U_f = 0,14V$ . Toto chování odpovídá výrobcem popsanému standartu a bylo diskutováno v kapitole 4.4.

Pro výpočet kapacity vycházíme z údajů naměřených při vybíjecím proudu  $I_d = 2,5A$ , jelikož křivka při tomto proudu vykazuje menší nelinearitu. Doba vybití superkapacitoru byla 22,5 minuty (1350 sekund).

Výpočet kapacity vychází ze vztahu 4.2 uvedeném v kapitole 4.4:

$$C = \frac{I_d \cdot t_d}{U_0 - U_f} = \frac{2,5 \cdot 1350}{2,75 - 0,14} = \underline{\underline{1293,1F}} \quad (6.3)$$

Měřením tedy bylo zjištěno, že velikost kapacity je přibližně stejná, jako udává výrobce superkapacitoru.

## 7. Závěr

Diplomová práce je rozdělena na dvě části – teoretickou a praktickou. V teoretické části byly rozebrány principy realizace regulovatelných zátěží, základní zapojení elektronických zátěží s různými polovodičovými prvky, nastíněny režimy činnosti zátěží a základní parametry a vlastnosti zátěží dostupných na trhu. Dále byly popsány oblasti použití elektronických zátěží.

V praktické části pak byla samotná elektronická zátěž realizována. Byly stanoveny základní parametry jejichž dodržení pak vedlo k navržení chlazení celé zátěže, vstupního bloku přepočítávajícího vstupní elektrické veličiny na řídicí napětí, samotného řídicího bloku ovládajícího proudové nory ve výkonovém bloku a v neposlední řadě byl navržen systém ochrany. Správnost realizace zadání pak byla ověřena měřením jednak samotných parametrů zátěže a jednak měřením vybraných zařízení.

Největší slabinou v realizaci elektronické zátěže je její velký vstupní odpor daný volbou ne příliš vhodných tranzistorů. V původním zadání bylo uvažováno s vyšším napětím zátěže. Avšak i po změně parametrů byly v zátěži osazeny tranzistory pro toto vyšší napětí. Tranzistory pro nižší napětí vykazují menší odpor v propustném stavu a jejich použitím by se vnitřní odpor zátěže podstatně snížil, čímž by byla zátěž použitelná pro zatěžování vyššími proudy i v oblasti nižších vstupních napětí.

Dalším nedostatkem, který byl odhalen až po měření, je ne příliš dobré chování zátěže v režimech konstantního odporu a konstantního výkonu. Nastavená konstantní hodnota se značně mění se změnami napětí testovaného zařízení. Pro konstantnější průběh by bylo třeba zajistit lepší zpětnou vazbu s použitím dalších obvodů. Například s využitím Nortonova zesilovače v případě režimu konstantního výkonu.

Přesto bylo měřeními dokázáno, že elektronická zátěž splňuje podmínky, které jsou na ni kladeny a jistě najde uplatnění při různých testováních ve školních laboratořích.

## 8. Použitá literatura

- [1] PUNČOCHÁŘ, Josef: Lineární obvody s elektronickými prvky; VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2001
- [2] PUNČOCHÁŘ, Josef: Operační zesilovače v elektronice; BEN – Technická literatura, 5.vydání, Praha, 2002
- [3] KREJČÍŘÍK, Alexandr: Zdroje proudu; BEN – Technická literatura, 1.vydání, Praha, 1999
- [4] CHLEBIŠ, Petr: Výkonová elektronika I; VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007
- [5] DVOŘÁK, Jan: Elektronická zátěž; Amatérské radio – Praktická elektronika; ročník VIII, číslo 7, 2003
- [6] STRAŠIL, Ivo: Přesná elektronická zátěž; Amatérské radio – Praktická elektronika; ročník XIII, číslo 5, 2008
- [7] Elektronická zátěž; Amatérské radio – Stavebnice a konstrukce; ročník III, číslo 3, 1999
- [8] BEČKA, Rudolf: Elektronická zátěž; Amatérské radio – Praktická elektronika; ročník I, číslo 5, 1996
- [9] Odporová zátěž MEATEST M-192; oficiální stránky společnosti MEATEST; dostupné online: <<http://www.meatest.cz/produkty/vykonove-napajeci-zdroje-elektronicke-zateze/ac-zateze/m192-programovateln-a-cdc-zatez-3kw/>>
- [10] Elektronická zátěž LD300; oficiální stránky společnosti THURBLY THANDAR INSTRUMENTS; dostupné online: <[www.tti-test.com/products-tti/pdf-brochure/prec-ld300-4p.pdf](http://www.tti-test.com/products-tti/pdf-brochure/prec-ld300-4p.pdf)>
- [11] Elektronické zátěže řady FCT<sup>IGBT</sup>; oficiální stránky společnosti DIGATRON; dostupné online: <[http://www.digatron.de/fileadmin/content/PDF/small/fct\\_igbt.pdf](http://www.digatron.de/fileadmin/content/PDF/small/fct_igbt.pdf)>
- [12] Elektronické zátěže řady TDI-DYNALOAD; oficiální stránky společnosti TDI POWER; dostupné online: <[http://www.tdi-power.com/PDF/dynaload/tdi\\_dynaload\\_electric\\_loads\\_dynaload\\_catalog.pdf](http://www.tdi-power.com/PDF/dynaload/tdi_dynaload_electric_loads_dynaload_catalog.pdf)>
- [13] Elektronické zátěže řady PLZ-U; oficiální stránky společnosti KIKUSUI; dostupné online: <<http://www.kikusui.co.jp/common/product/pdf/plz-u.pdf>>
- [14] Elektronické zátěže řady eLoad; oficiální stránky společnosti AMREL; dostupné online: <[http://www.amrelpower.com/AMRELPowerProducts/eload\\_programmable\\_load.html](http://www.amrelpower.com/AMRELPowerProducts/eload_programmable_load.html)>
- [15] Elektronické zátěže CHROMA řady 63200; oficiální stránky společnosti CHROMA; dostupné online: <<http://www.chromausa.com/pdf/63200.pdf>>
- [16] O'DONNELL, Martin: Selecting an Electronic Load for Power Supply & DC to DC Converter Testing; Chroma Systems Solutions, USA, 2009; dostupné online: <<http://www.dclloads.com/Selecting%20an%20Electronic%20Load%20for%20Power%20Supply.pdf>>
- [17] Elektronické zátěže řady HP 6050A – 6063B, 60501B – 60507B; HEWLETT-PACKARD; dostupné online: <<http://www.testequipmentconnection.com/specs/HP%206050A%20SPECS.PDF>>
- [18] BURKE, Andrew: Testing of Supercapacitors: Capacitance, Resistance, and Energy and Power Capacity; Institute of Transportation Studies, University of California-Davis, USA, 2009; dostupné online: <[http://pubs.its.ucdavis.edu/download\\_pdf.php?id=1308](http://pubs.its.ucdavis.edu/download_pdf.php?id=1308)>
- [19] Popis superkapacitorů MAXWELL; oficiální stránky společnosti ECOM; dostupné online:

<<http://www.ecom.cz/files/documents-news/108.pdf>>

[20] Katalog superkapacitorů MAXWELL; oficiální stránky společnosti ECOM; dostupné online: <<http://www.ecom.cz/files/documents-catalogue/47.pdf>>

[21] ŘEZNÍČEK, Martin: Inovace měřicího pracoviště pro měření solárních článků; Diplomová práce, FEKT VUT Brno, 2009

[22] HAMMERBAUER, Jiří: Olověné akumulátory; Elektronický text, Fakulta elektrotechnická ZČU v Plzni, Plzeň, 2006; dostupné online: <<http://www.jergym.hiedu.cz/~canovm/elektro/clanky2/olov.pdf>>

[23] Katalogový list tranzistoru STW11NK100Z; dostupné online <<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/229805/STMICROELECTRONICS/STW11NK100Z.html>>

[24] Katalogový list operačního zesilovače OPA2134; dostupné online: <<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/56739/BURR-BROWN/OPA2134.html>>

[25] Katalogový list ventilátoru SUNON EEC0381B2-F99; dostupné online: <[http://www.gme.cz/\\_dokumentace/dokumenty/625/625-250/dsh.625-250.1.pdf](http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/625/625-250/dsh.625-250.1.pdf)>

[26] Katalogový list čidla LA 55-P; dostupné online: <<http://www.lem.com/docs/products/la%2055-p%20e.pdf>>

[27] Chlazení bezpotenciálových modulů – metodika výpočtu; aplikační list; ČKD Power Electronics

[28] Katalogový list násobičky AD633; dostupné online: <<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/48101/AD/AD633.html>>

## 9. Seznam příloh

- 1) Schéma zapojení výkonového bloku
- 2) Schéma zapojení řídicího bloku
- 3) Schéma zapojení vstupního bloku
- 4) Schéma zapojení napájecího zdroje
- 5) Deska plošného spoje výkonového bloku
- 6) Deska plošného spoje řídicího bloku
- 7) Deska plošného spoje vstupního bloku
- 8) Deska plošného spoje napájecího zdroje